

本节内容

堆排序

知识总览

选择排序

简单选择排序

堆排序

重点来了 快认真听



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最小（或最大）的元素加入有序子序列

什么是“堆 (Heap)”?



若 n 个关键字序列 $L[1...n]$ 满足下面某一条性质, 则称为堆 (Heap) :

- ① 若满足: $L(i) \geq L(2i)$ 且 $L(i) \geq L(2i+1)$ ($1 \leq i \leq n/2$) —— 大根堆 (大顶堆)
- ② 若满足: $L(i) \leq L(2i)$ 且 $L(i) \leq L(2i+1)$ ($1 \leq i \leq n/2$) —— 小根堆 (小顶堆)

大根堆

	87	45	78	32	17	65	53	09
0	1	2	3	4	5	6	7	8



小根堆

	09	45	17	65	53	32	87	78
0	1	2	3	4	5	6	7	8



二叉树的顺序存储



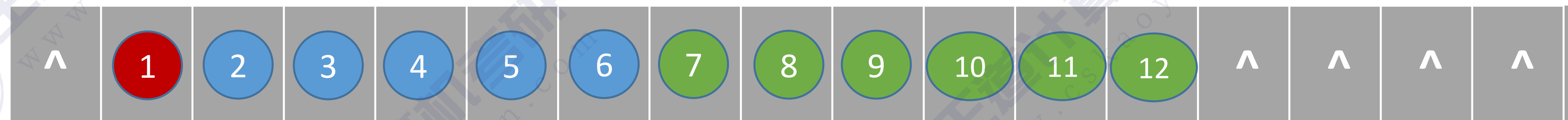
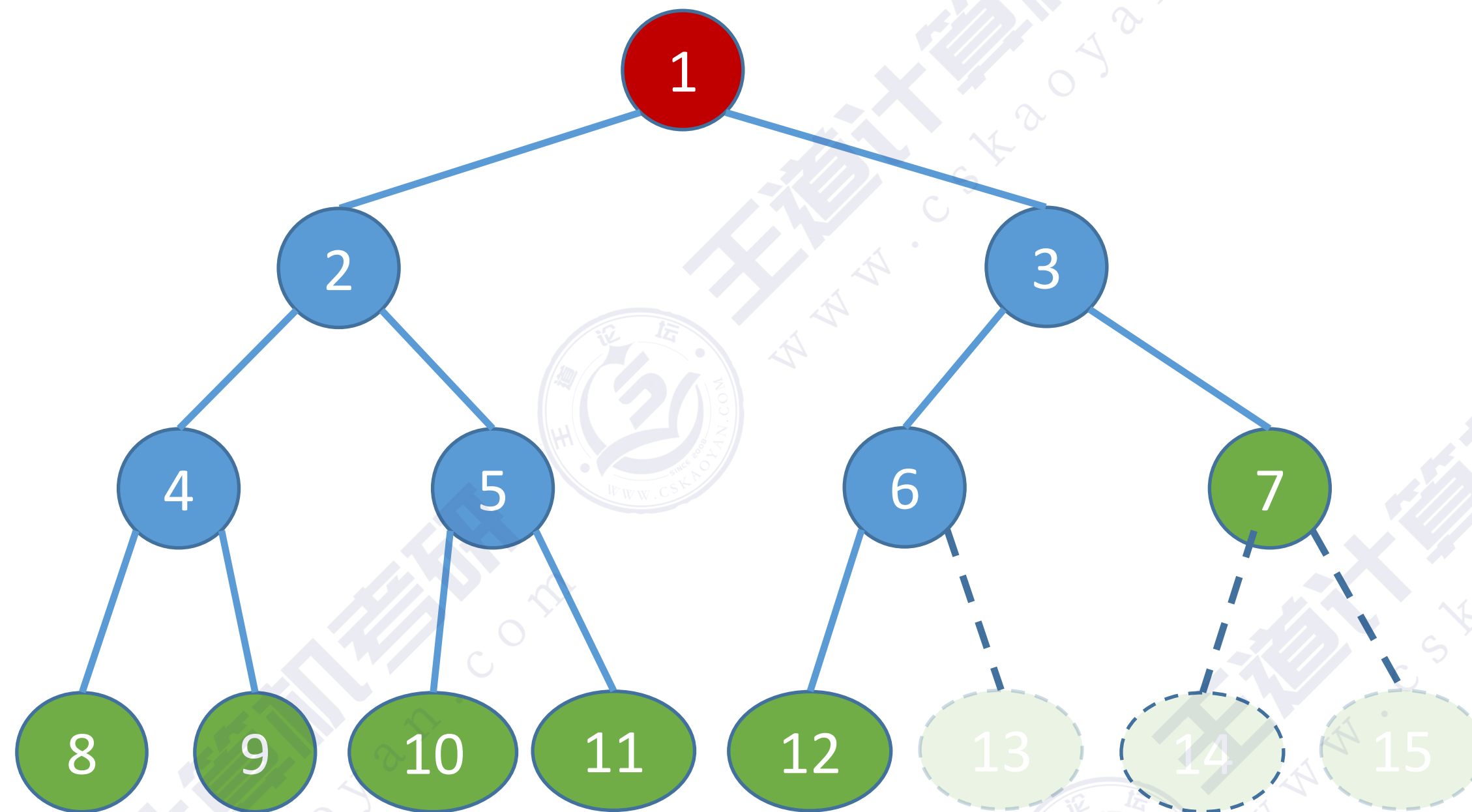
丧失记忆中...

几个重要常考的基本操作：

- i 的左孩子 —— $2i$
- i 的右孩子 —— $2i+1$
- i 的父节点 —— $\lfloor i/2 \rfloor$
- i 所在的层次 —— $\lceil \log_2(n+1) \rceil$ 或 $\lfloor \log_2 n \rfloor + 1$

若完全二叉树中共有 n 个结点，则

- 判断 i 是否有左孩子？ —— $2i \leq n$?
- 判断 i 是否有右孩子？ —— $2i+1 \leq n$?
- 判断 i 是否是叶子/分支结点？ —— $i > \lfloor n/2 \rfloor$?



$t[0]$ $t[1]$ $t[2]$

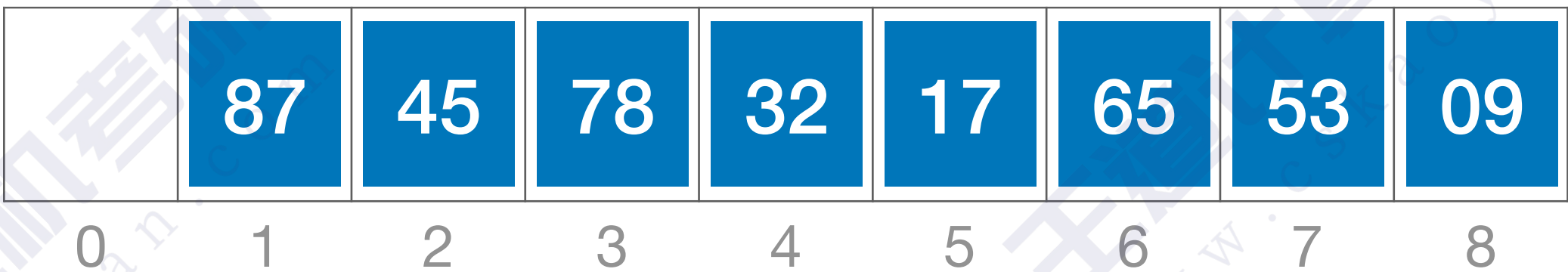
什么是“堆 (Heap)”?



若 n 个关键字序列 $L[1...n]$ 满足下面某一条性质, 则称为堆 (Heap):

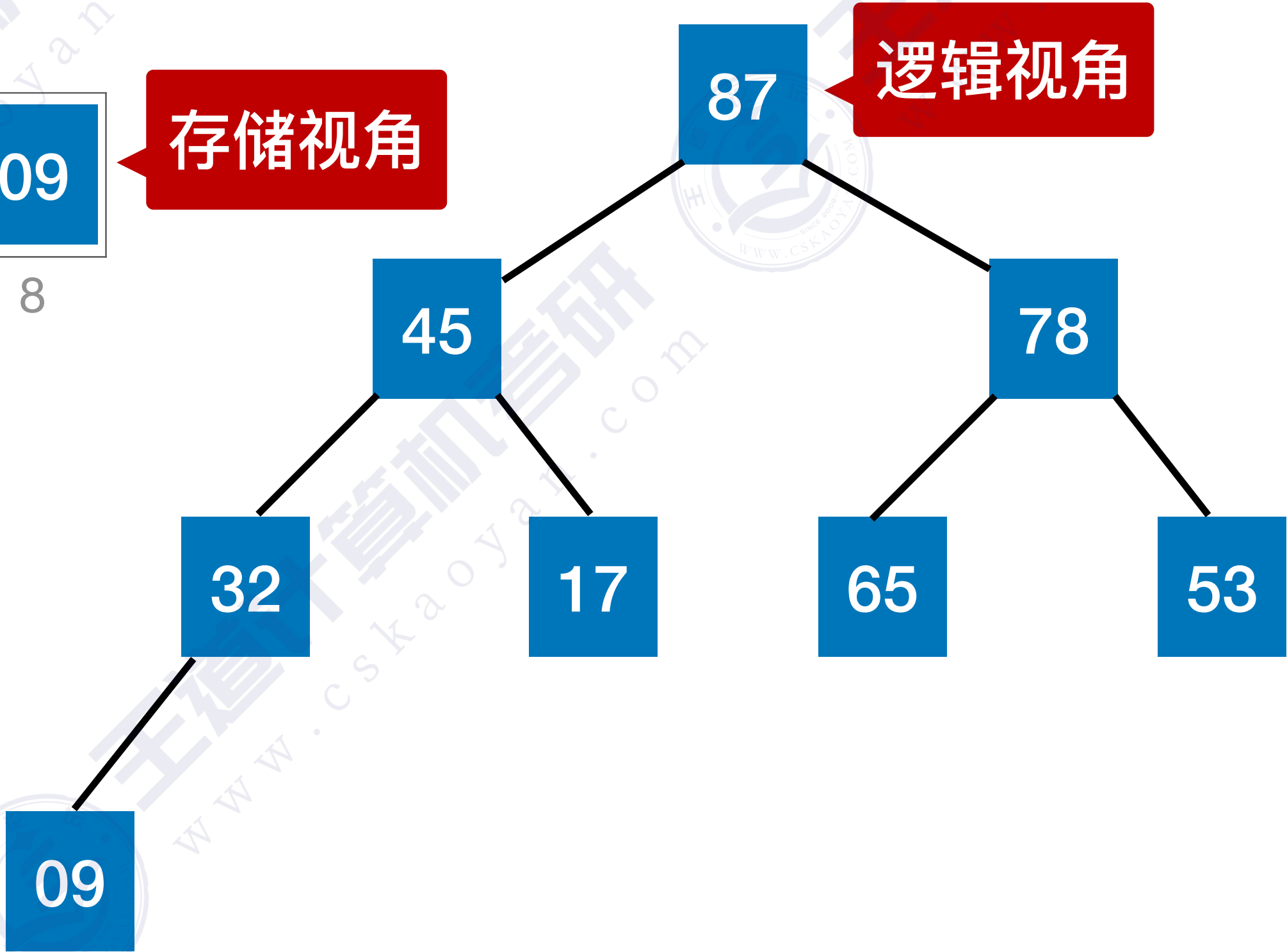
- ① 若满足: $L(i) \geq L(2i)$ 且 $L(i) \geq L(2i+1)$ ($1 \leq i \leq n/2$) —— 大根堆 (大顶堆)
- ② 若满足: $L(i) \leq L(2i)$ 且 $L(i) \leq L(2i+1)$ ($1 \leq i \leq n/2$) —— 小根堆 (小顶堆)

大根堆



存储视角

逻辑视角



大根堆: 完全二叉树中, 根 \geq 左、右



简单点
说话的方式简单点



小声BB...

(对比BST: 左 \leq 根 \leq 右)

什么是“堆 (Heap)”?

若 n 个关键字序列 $L[1...n]$ 满足下面某一条性质, 则称为堆 (Heap):

- ① 若满足: $L(i) \geq L(2i)$ 且 $L(i) \geq L(2i+1)$ ($1 \leq i \leq n/2$) —— 大根堆 (大顶堆)
- ② 若满足: $L(i) \leq L(2i)$ 且 $L(i) \leq L(2i+1)$ ($1 \leq i \leq n/2$) —— 小根堆 (小顶堆)



简单点
说话的方式简单点



小声BB...

如何基于“堆”进行排序？

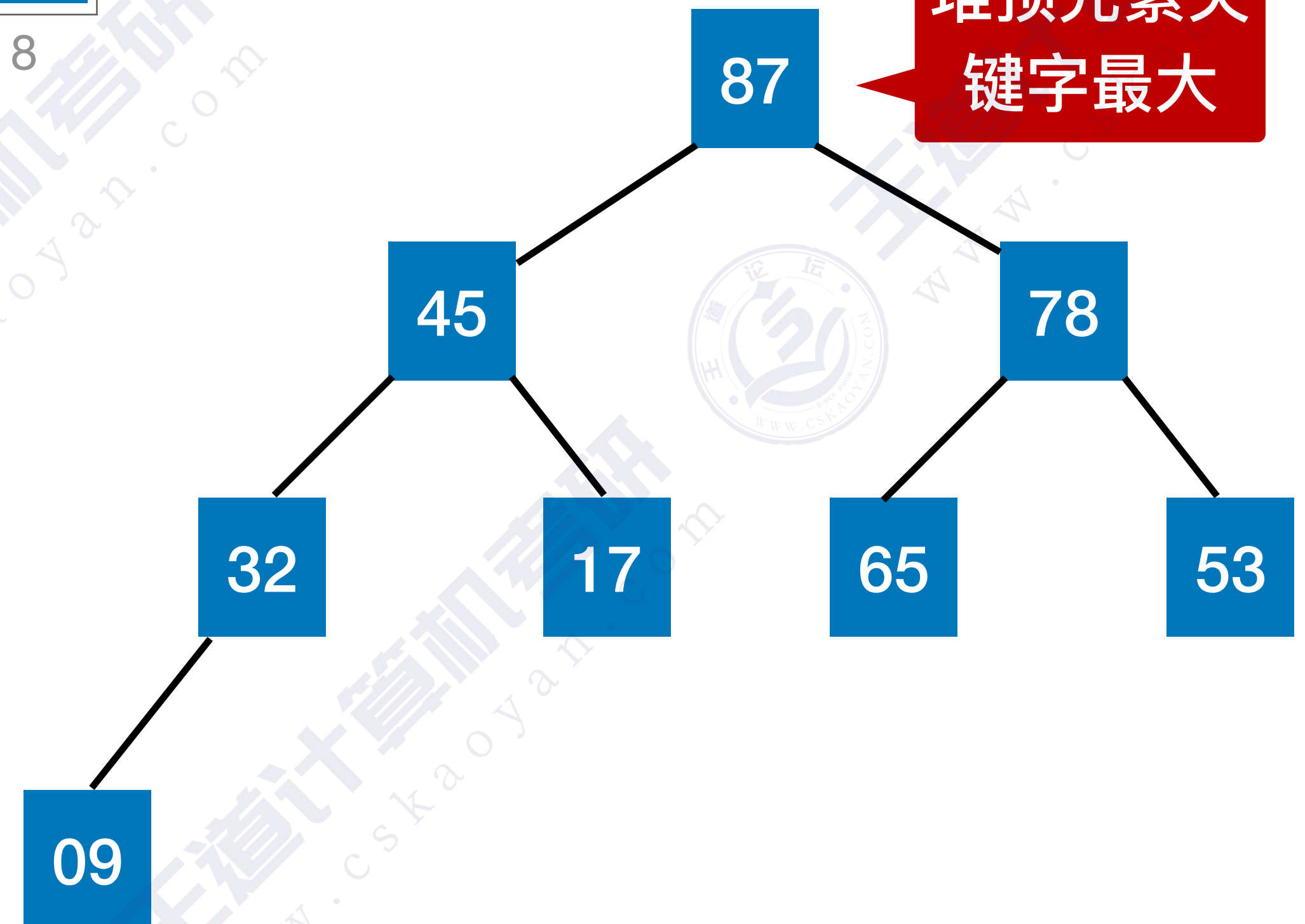
大根堆



大根堆：根 \geq 左、右



堆顶元素关键字最大



选择排序

简单选择排序

堆排序

选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最小（或最大）的元素加入有序子序列

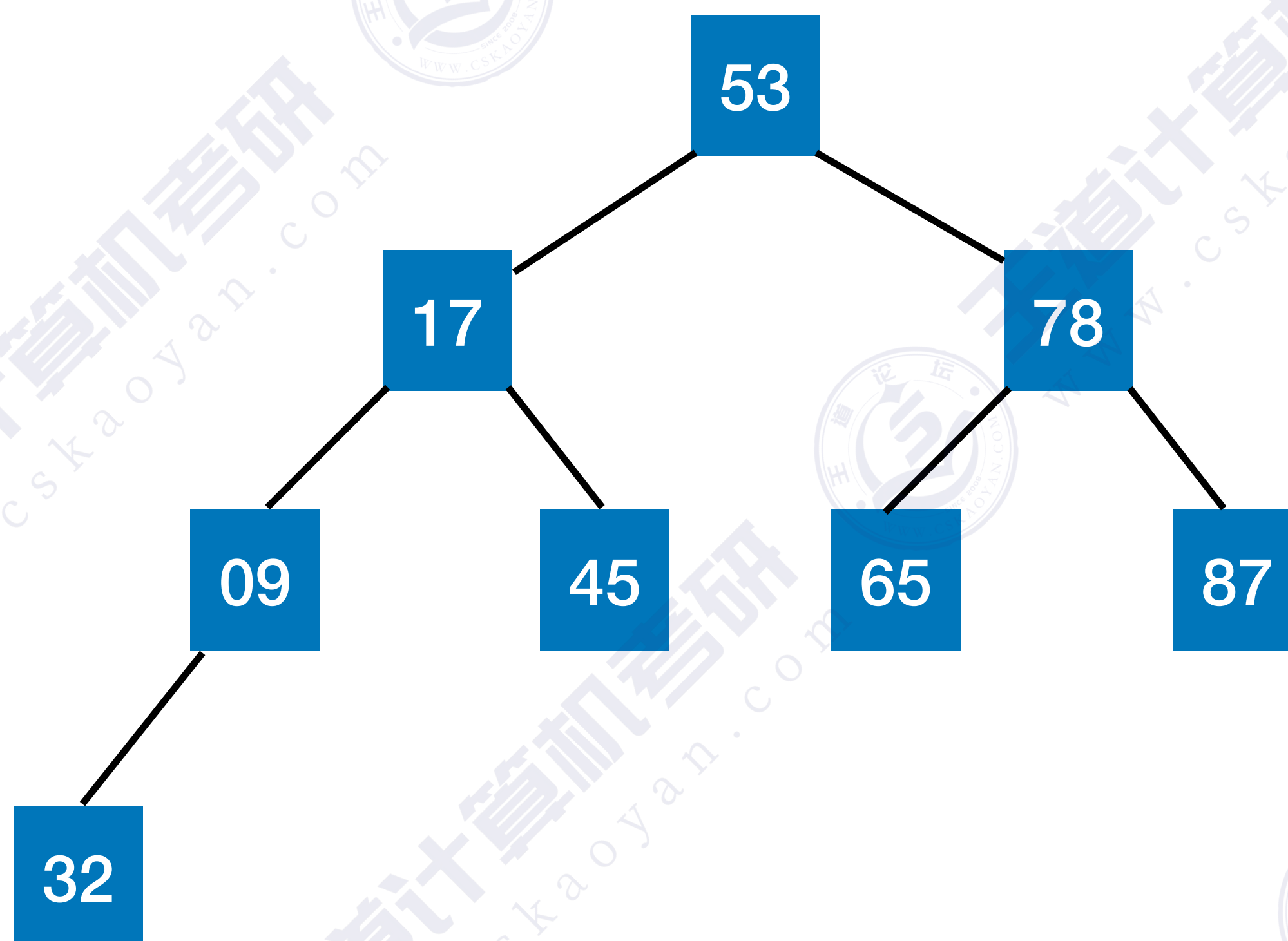
建立大根堆

初始序列

	53	17	78	09	45	65	87	32
0	1	2	3	4	5	6	7	8

大根堆：根 \geq 左、右

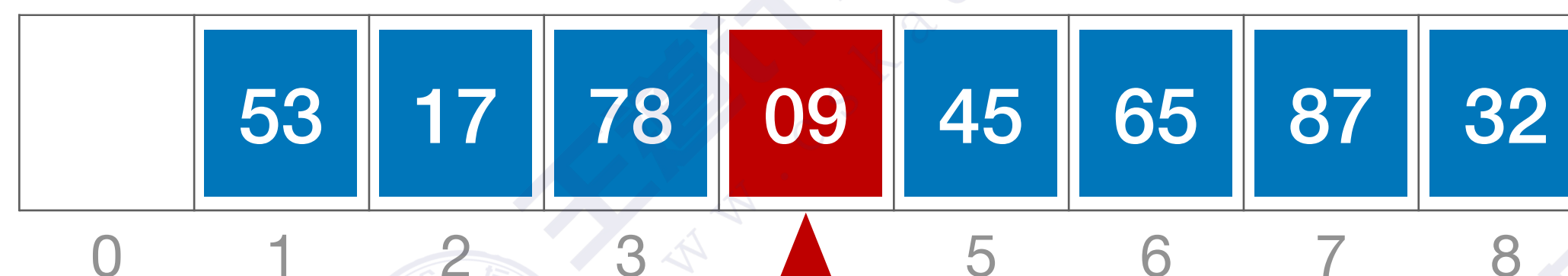
思路：把所有非终端结点都检查一遍，是否满足大根堆的要求，如果不满足，则进行调整



在顺序存储的完全二叉树中，非终端结点编号 $i \leq \lfloor n/2 \rfloor$

建立大根堆

初始序列

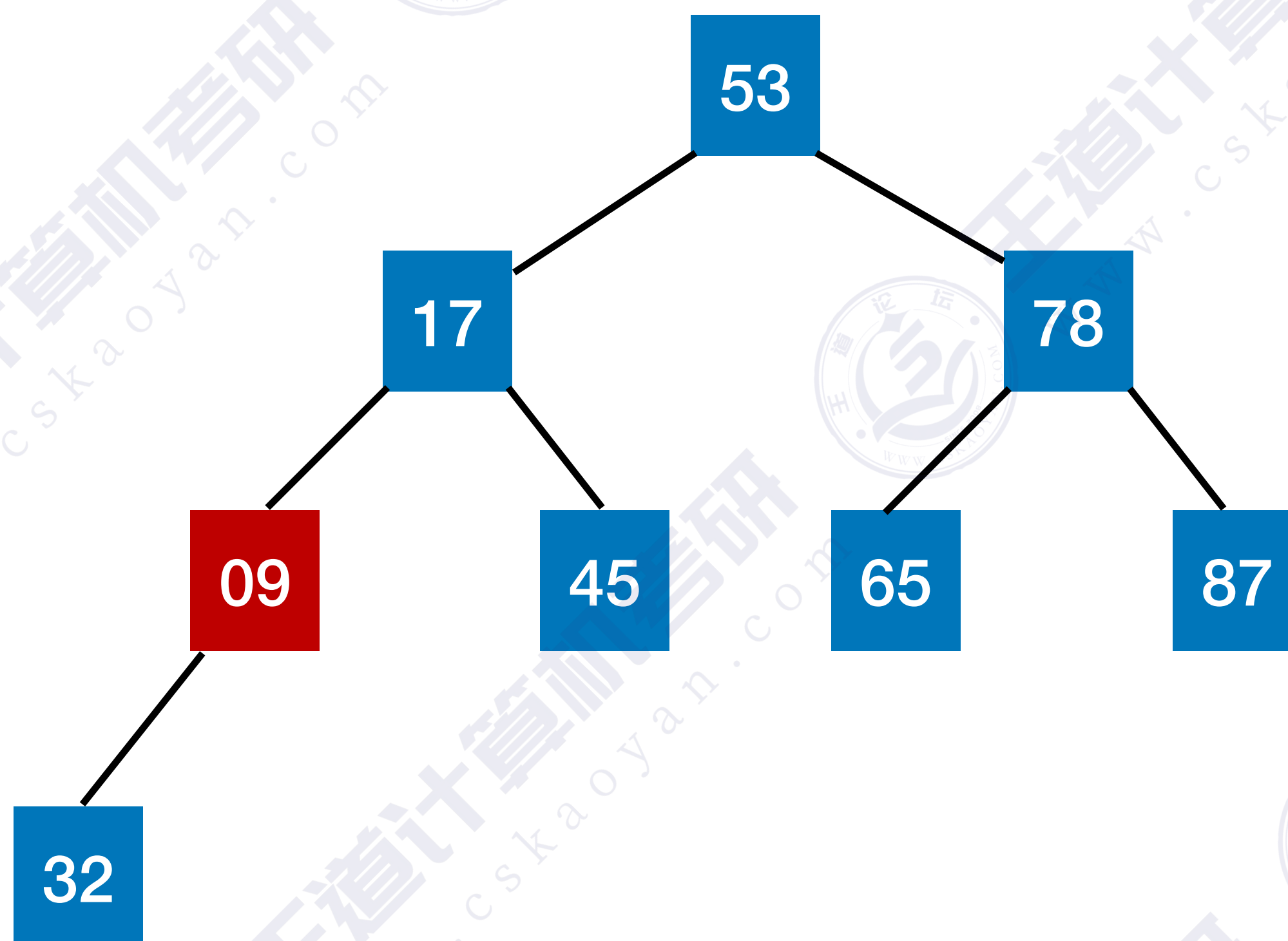


大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整

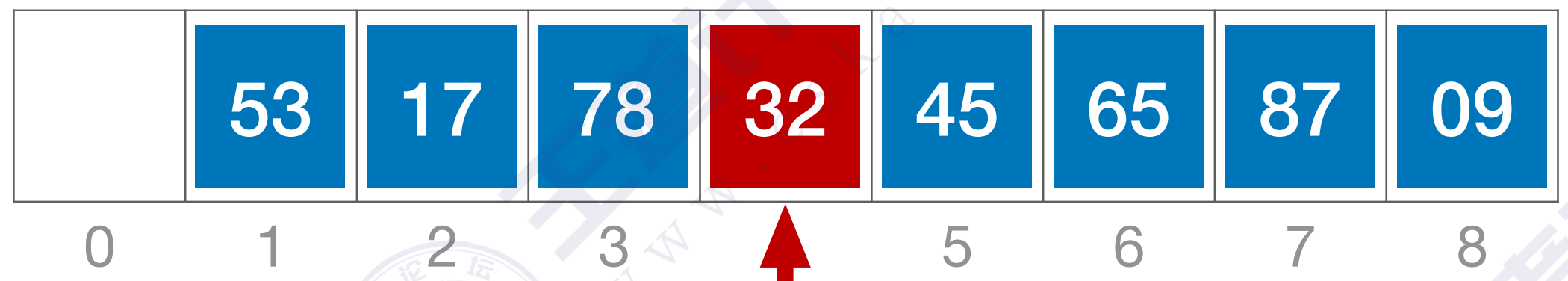
检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

- i 的左孩子 —— $2i$
- i 的右孩子 —— $2i+1$
- i 的父节点 —— $\lfloor i/2 \rfloor$



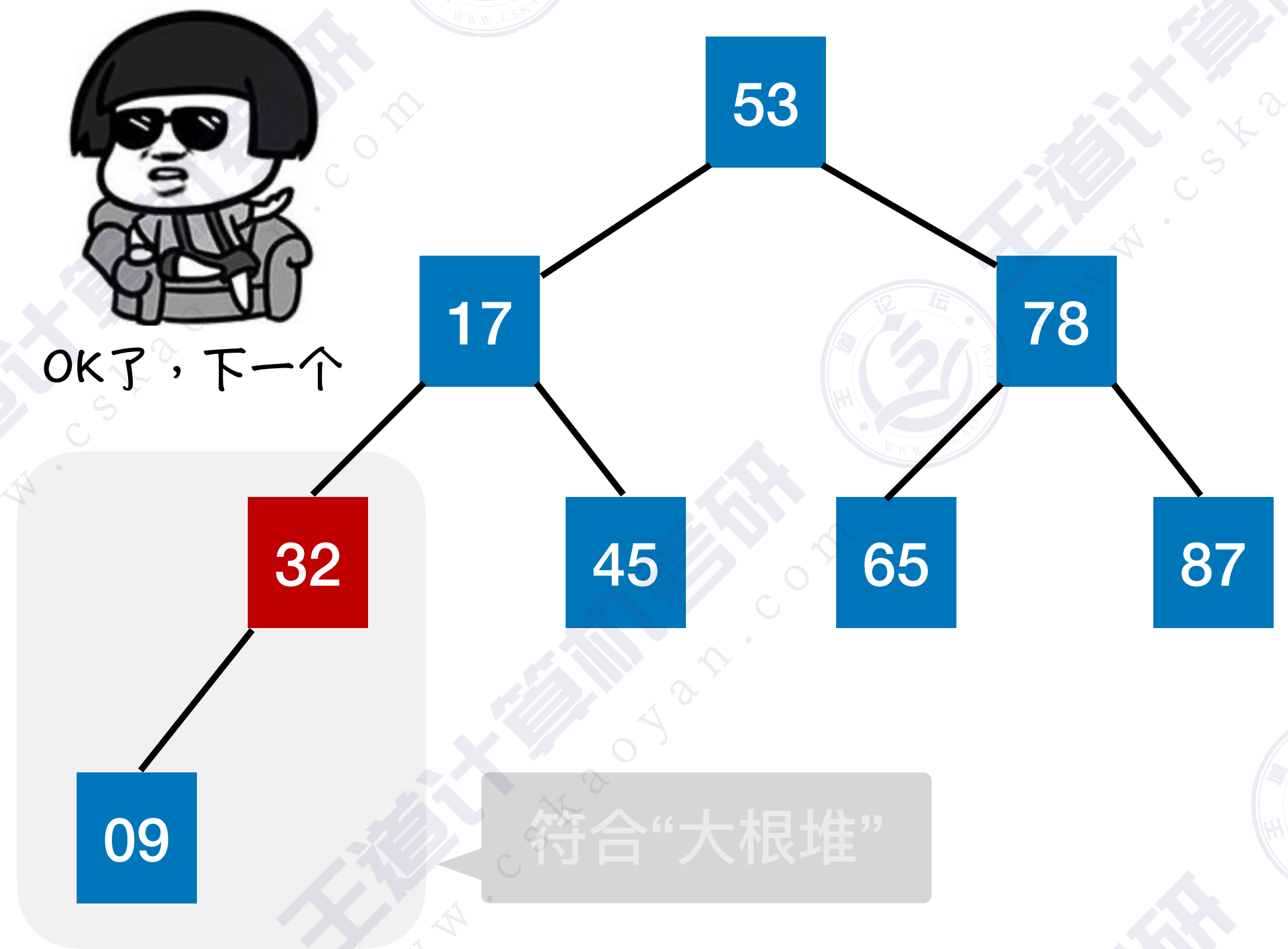
建立大根堆

初始序列



大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整



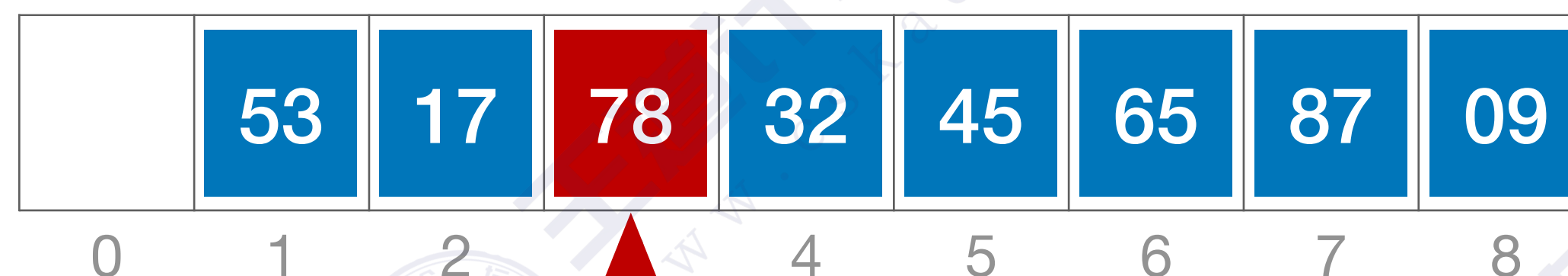
OK了, 下一个

检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

- i 的左孩子 $2i$
- i 的右孩子 $2i+1$
- i 的父节点 $\lfloor i/2 \rfloor$

建立大根堆

初始序列

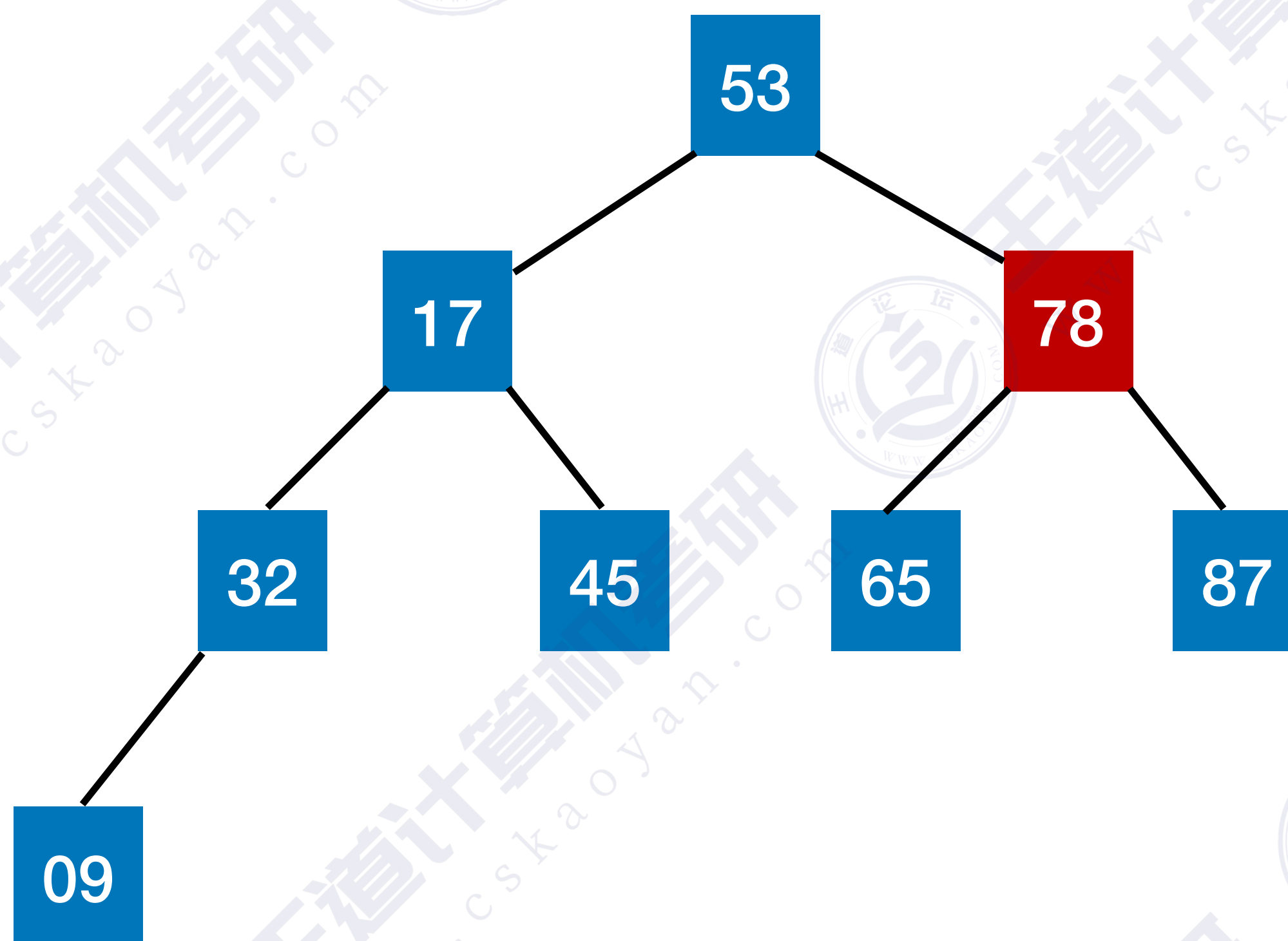


大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整

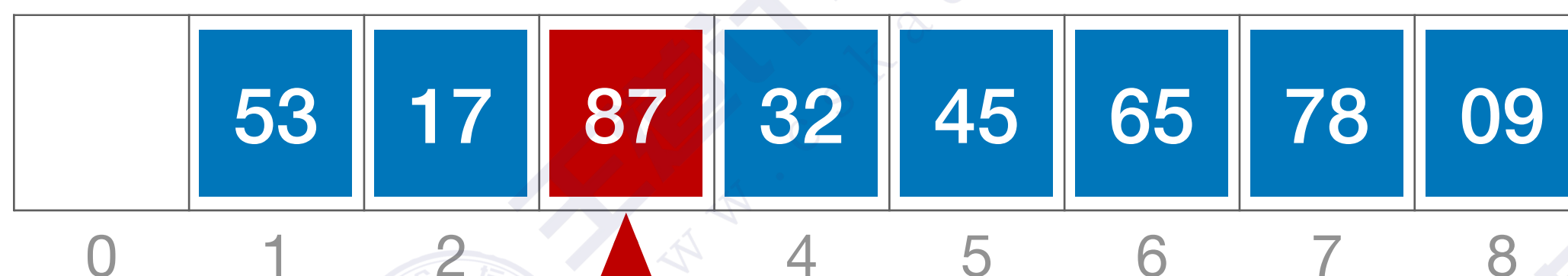
检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

- i 的左孩子 —— $2i$
- i 的右孩子 —— $2i+1$
- i 的父节点 —— $\lfloor i/2 \rfloor$



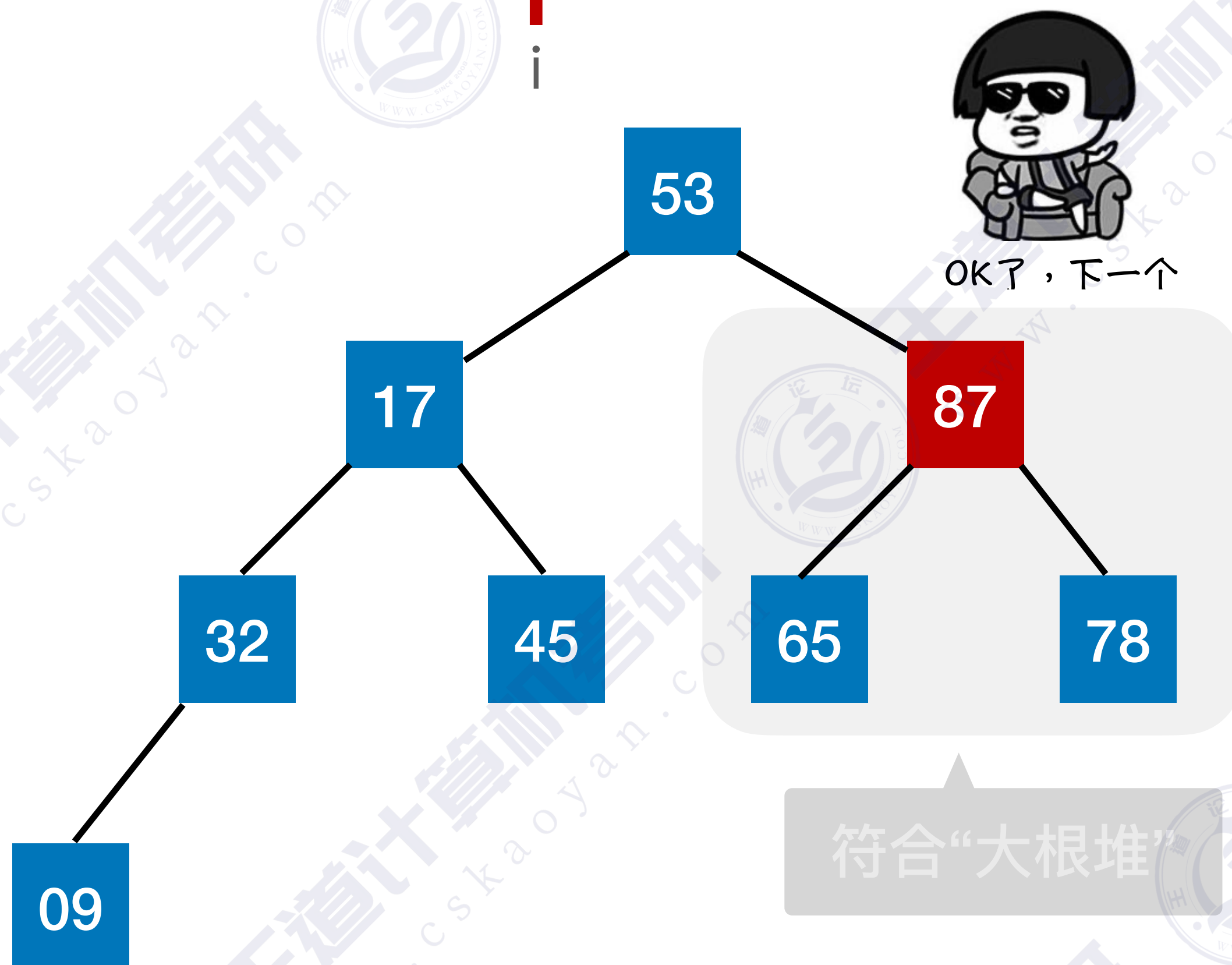
建立大根堆

初始序列



大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整



检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

- i 的左孩子 $2i$
- i 的右孩子 $2i+1$
- i 的父节点 $\lfloor i/2 \rfloor$

符合“大根堆”

建立大根堆

初始序列

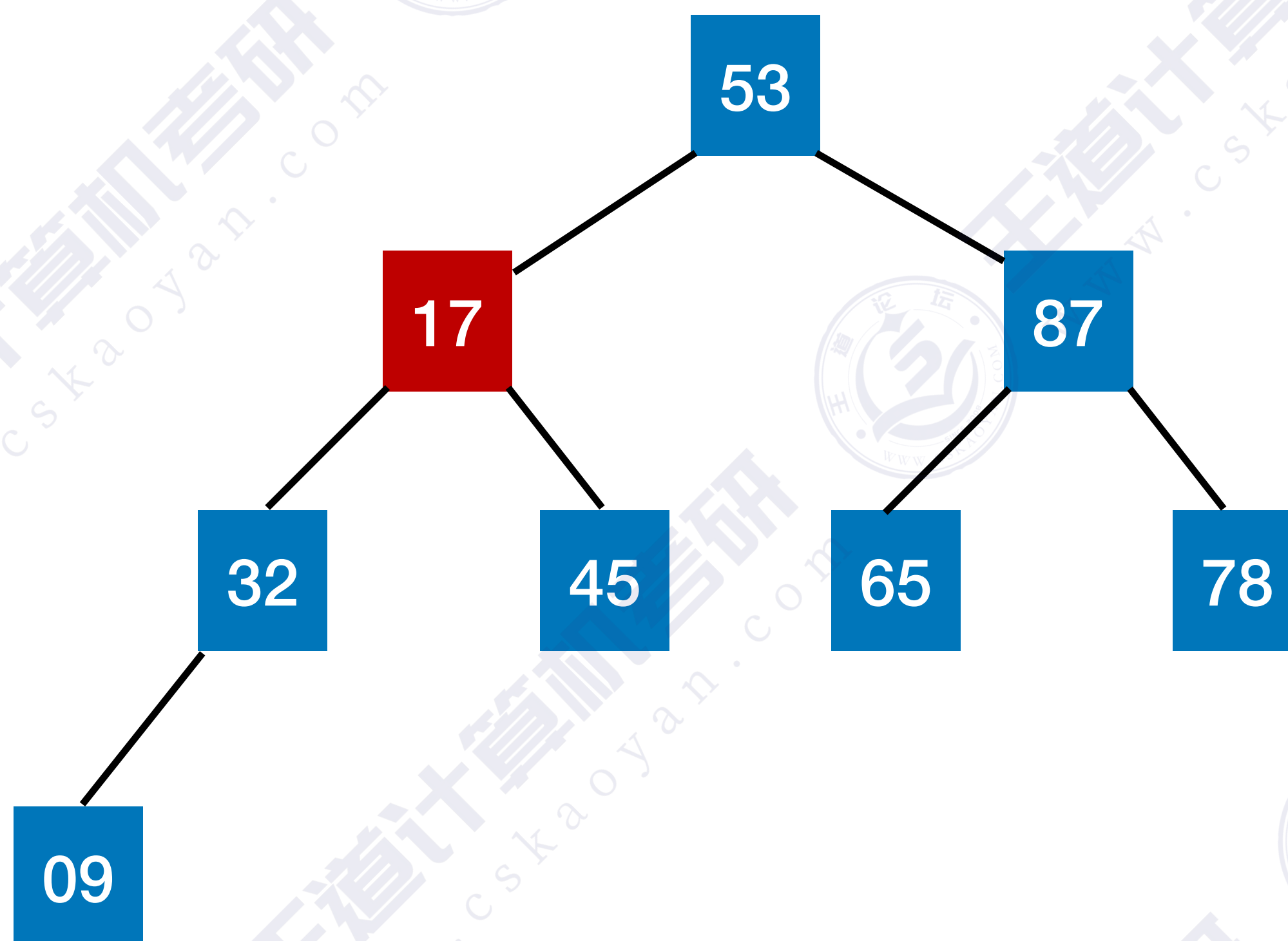


大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整

检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

- i 的左孩子 $2i$
- i 的右孩子 $2i+1$
- i 的父节点 $\lfloor i/2 \rfloor$



建立大根堆

初始序列

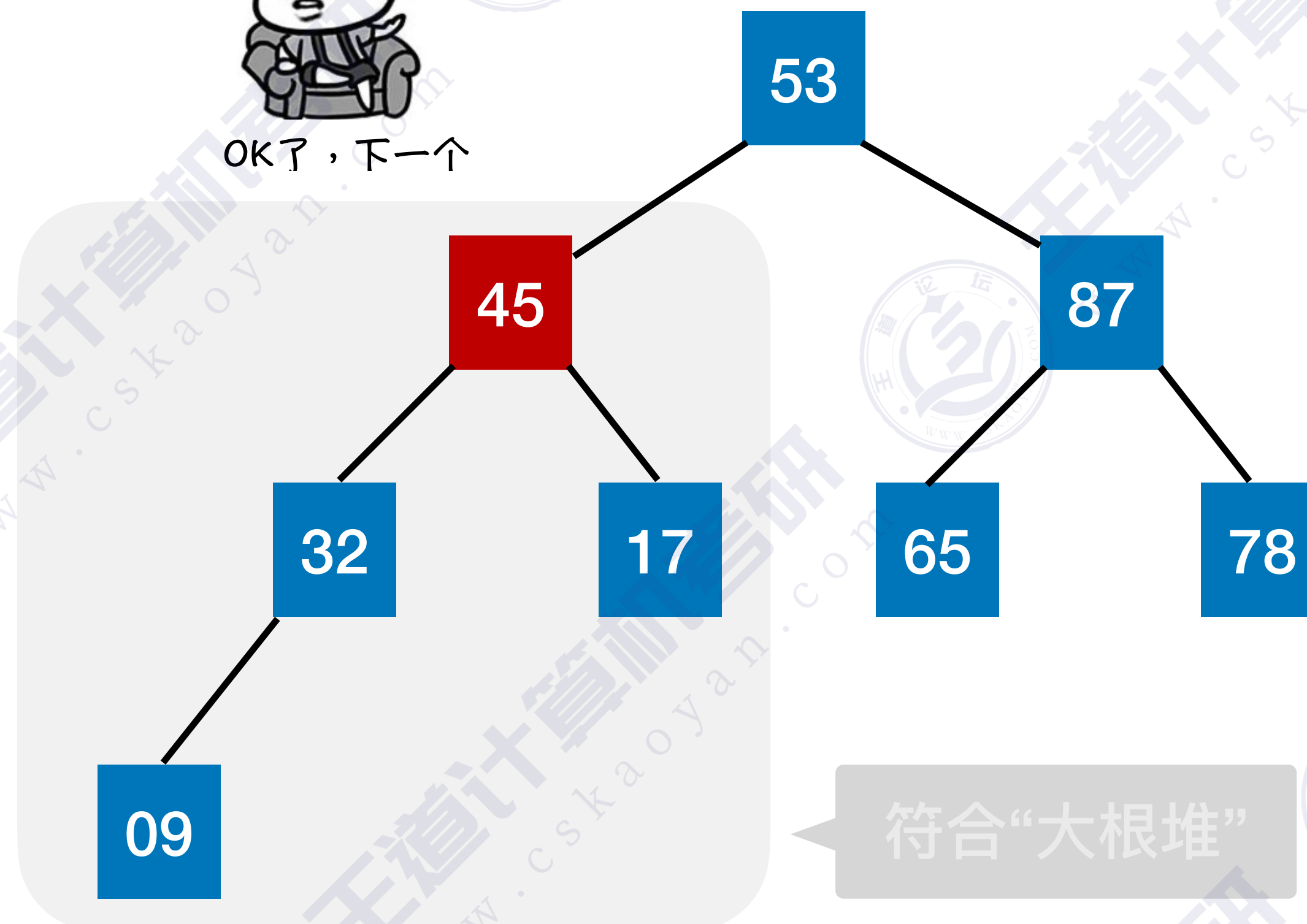


大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整



OK了, 下一个

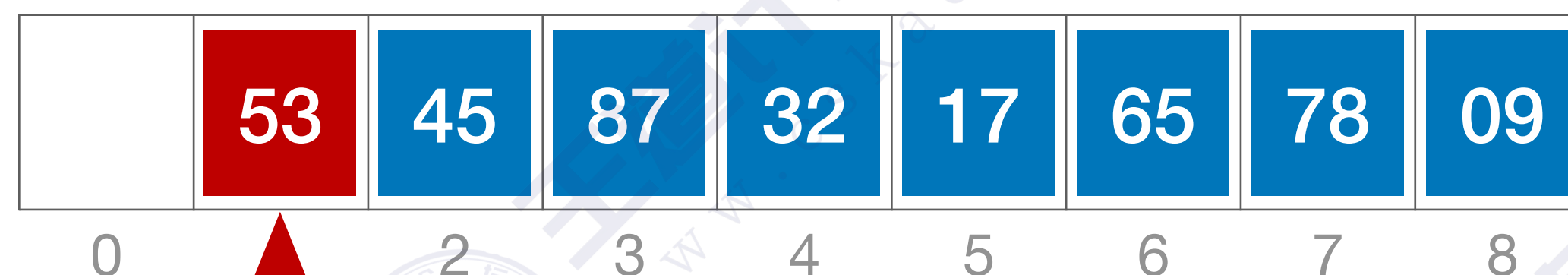


检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

- i 的左孩子 $2i$
- i 的右孩子 $2i+1$
- i 的父节点 $\lfloor i/2 \rfloor$

建立大根堆

初始序列

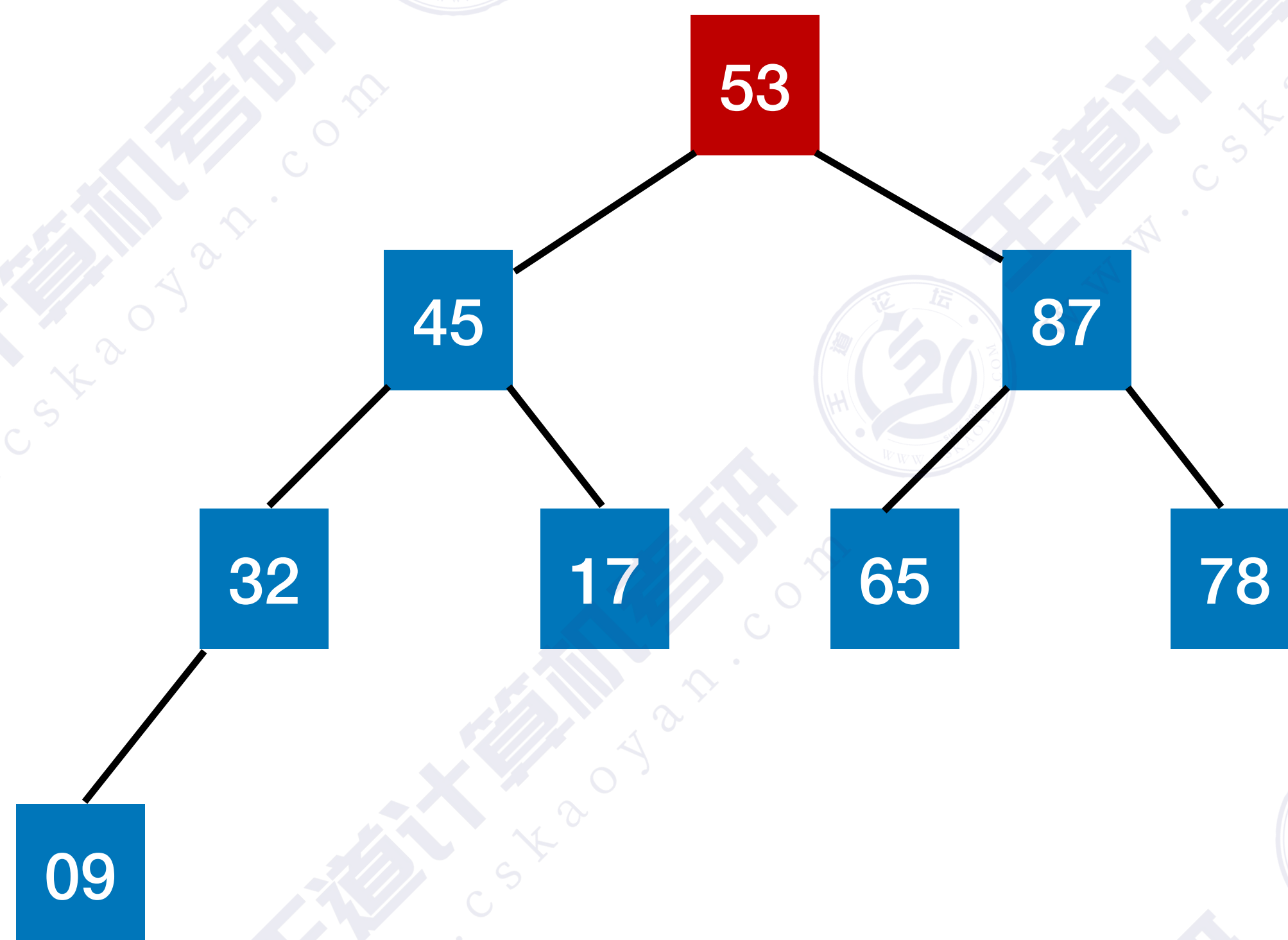


大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整

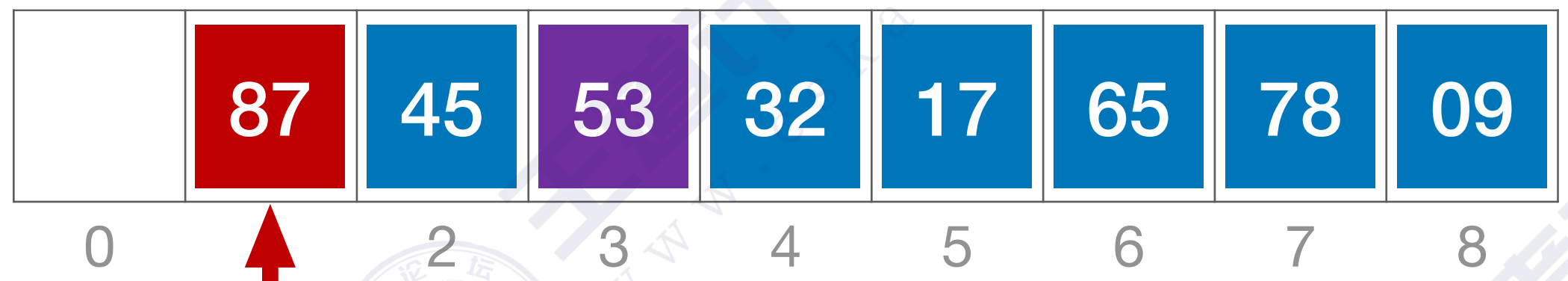
检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

- i 的左孩子 $2i$
- i 的右孩子 $2i+1$
- i 的父节点 $\lfloor i/2 \rfloor$



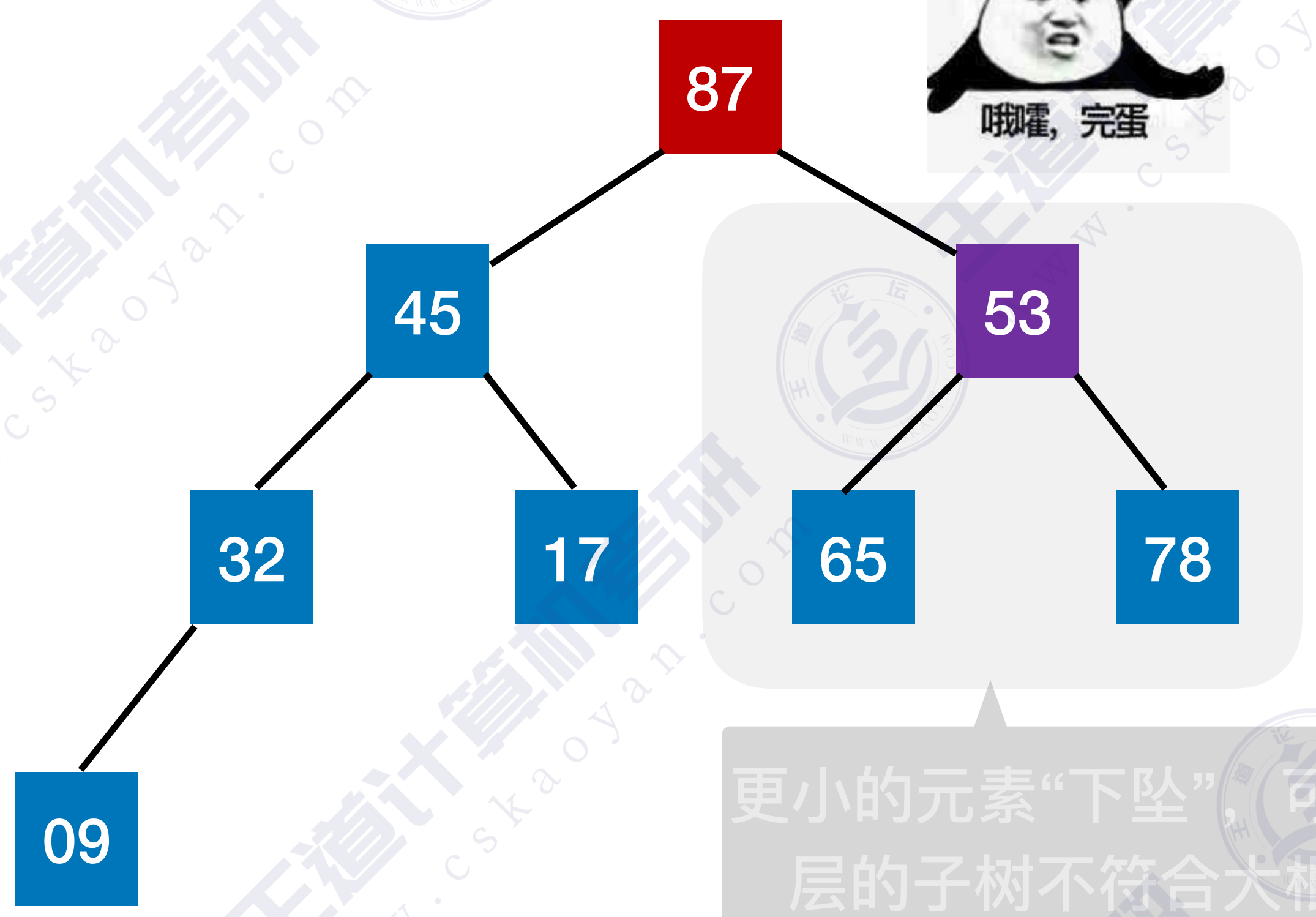
建立大根堆

初始序列



大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整



检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

- i 的左孩子 $2i$
- i 的右孩子 $2i+1$
- i 的父节点 $\lfloor i/2 \rfloor$

更小的元素“下坠”, 可能导致下一层的子树不符合大根堆的要求

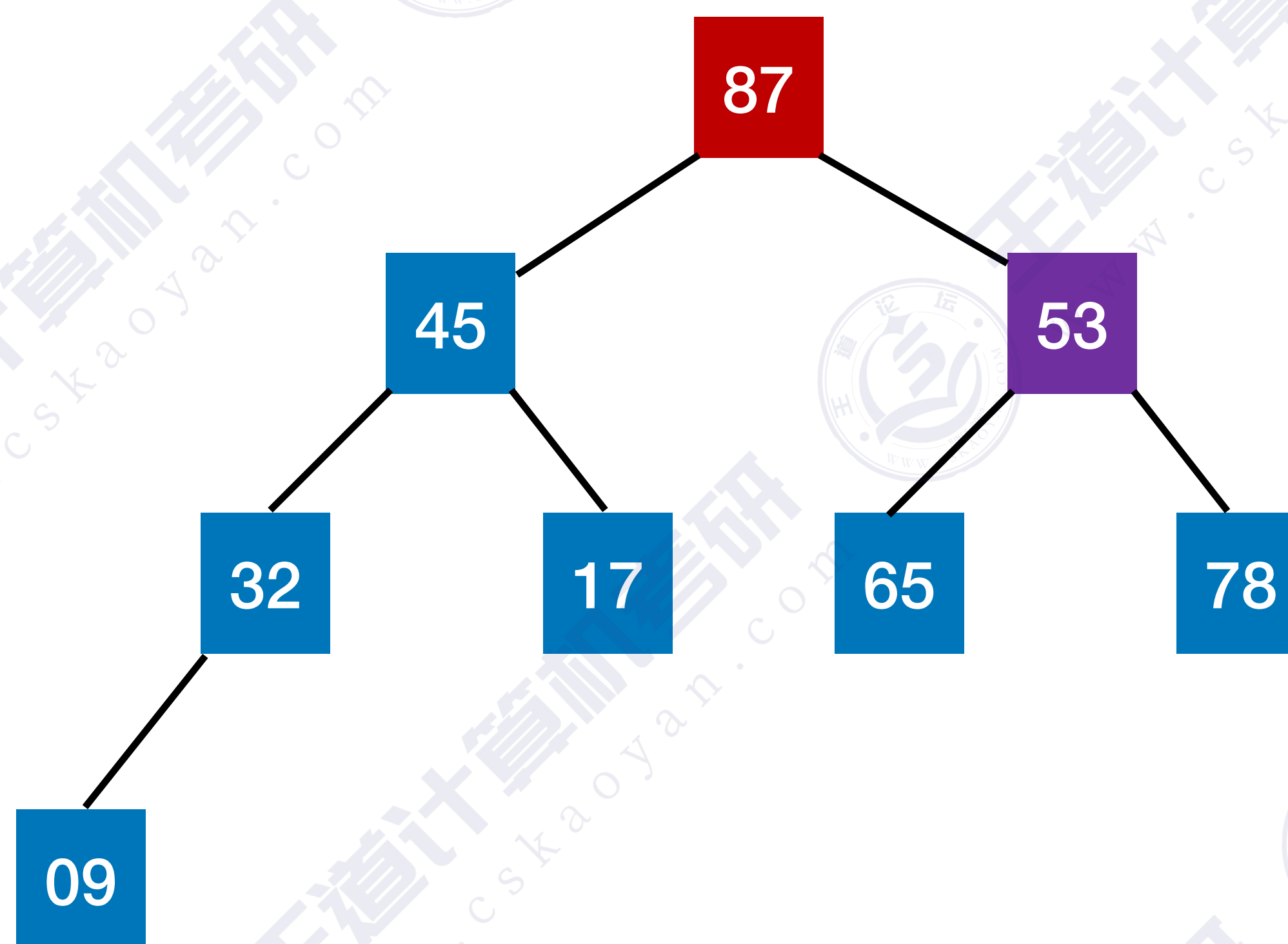
建立大根堆

初始序列



大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整



检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

若元素互换破坏了下一级的堆, 则采用相同的方法继续往下调整 (小元素不断“下坠”)

- i 的左孩子 $2i$
- i 的右孩子 $2i+1$
- i 的父节点 $\lfloor i/2 \rfloor$

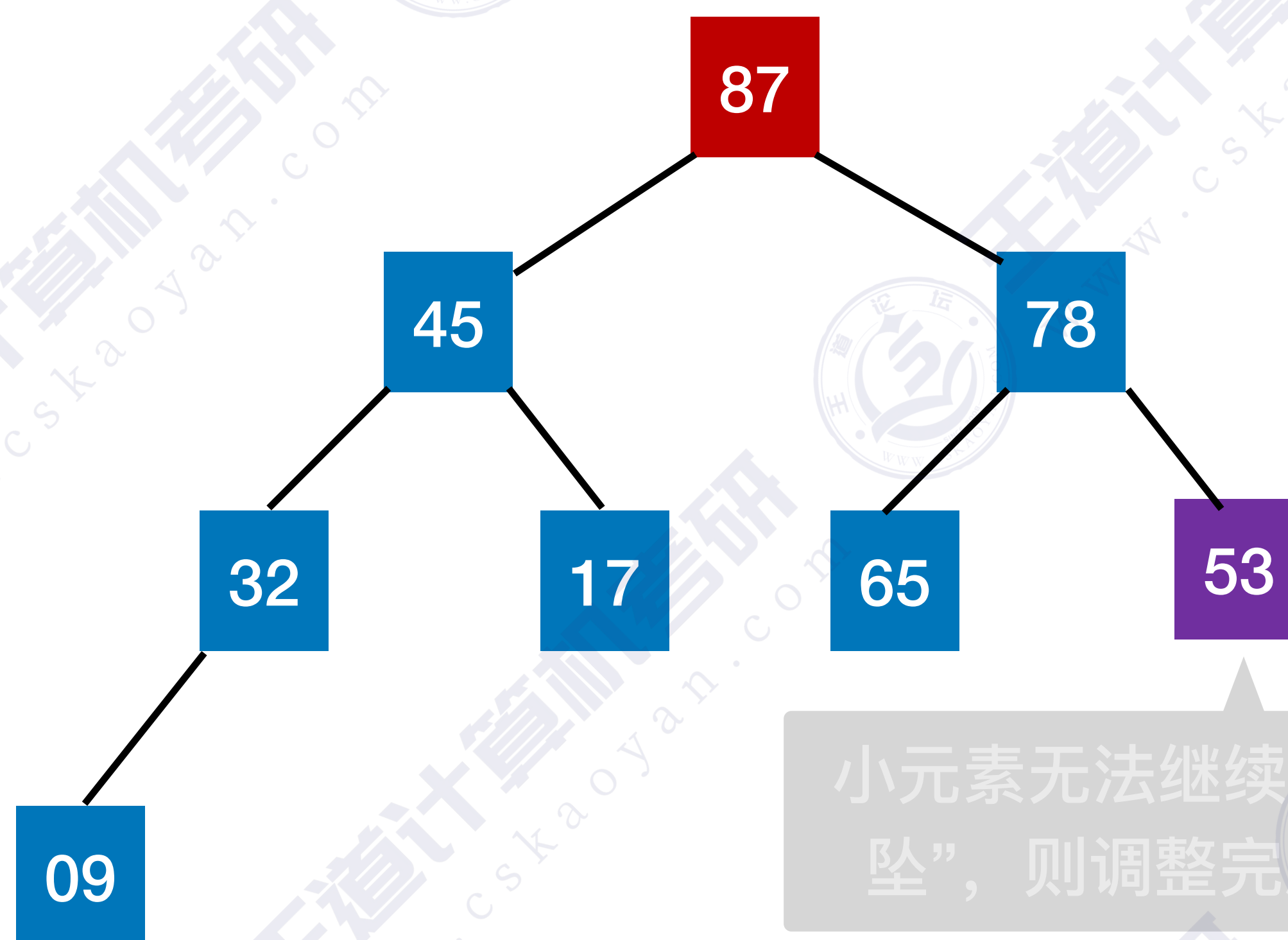
建立大根堆

初始序列



大根堆: 根 \geq 左、右

思路: 把所有非终端结点都检查一遍, 是否满足大根堆的要求, 如果不满足, 则进行调整



检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足, 将当前结点与更大的一个孩子互换

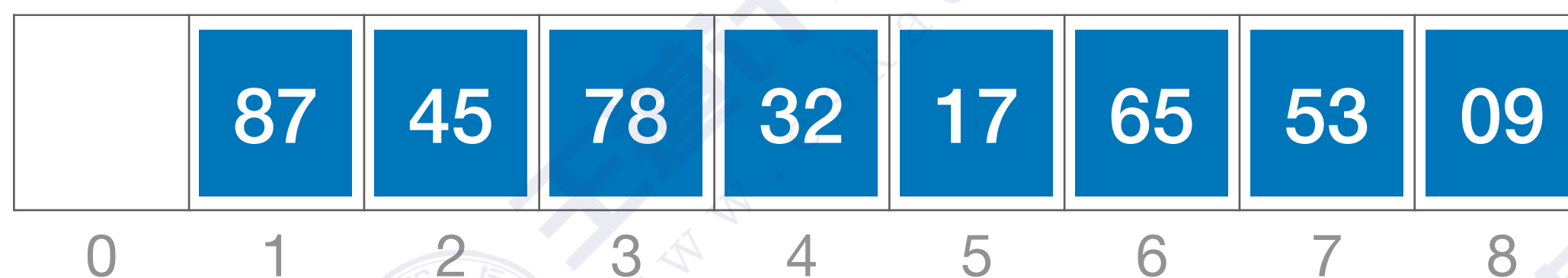
若元素互换破坏了下一级的堆, 则采用相同的方法继续往下调整 (小元素不断“下坠”)

- i 的左孩子 —— $2i$
- i 的右孩子 —— $2i+1$
- i 的父节点 —— $\lfloor i/2 \rfloor$

小元素无法继续“下坠”, 则调整完成

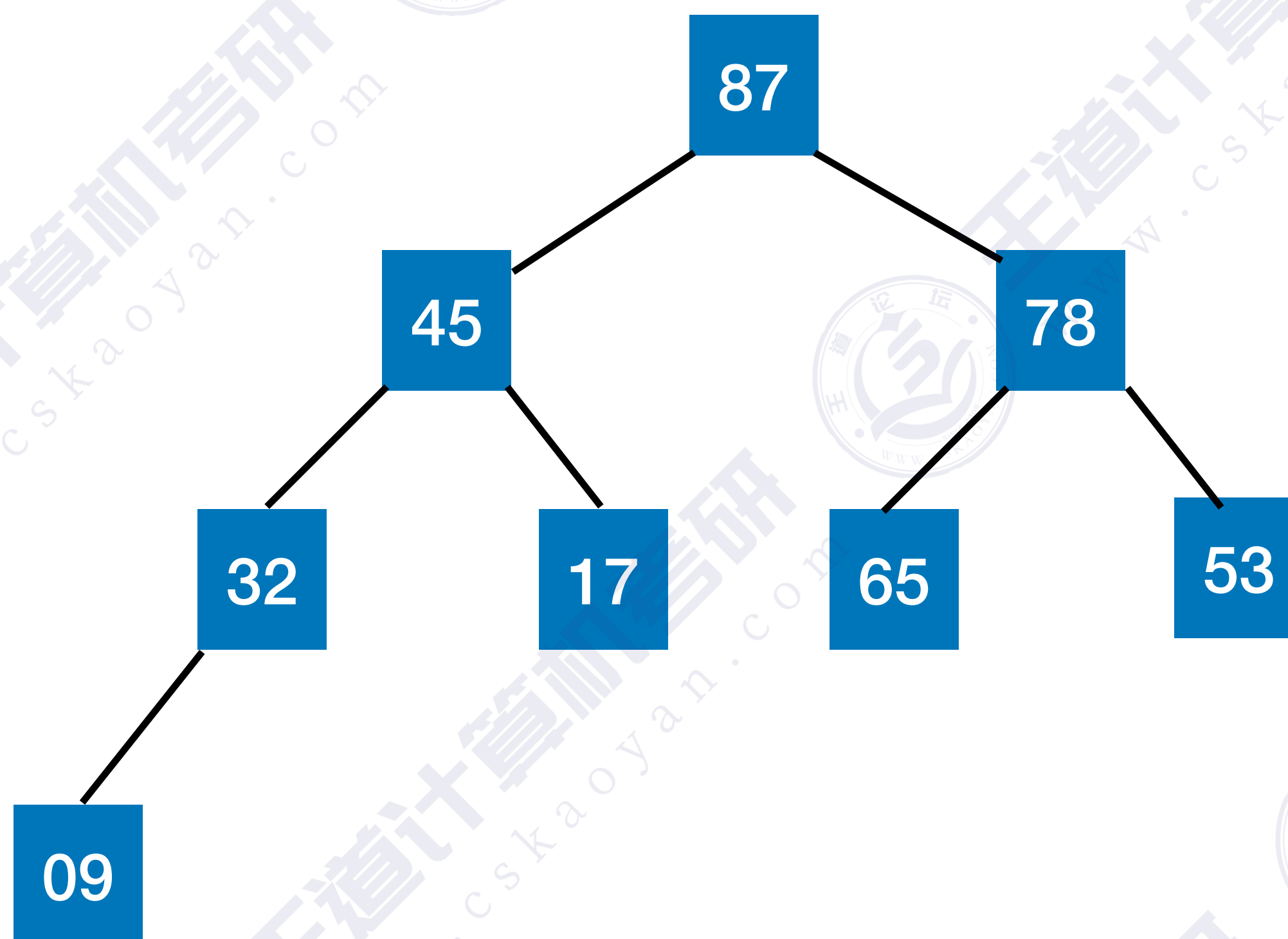
建立大根堆

大根堆



大根堆：根 \geq 左、右

思路：把所有非终端结点都检查一遍，是否满足大根堆的要求，如果不满足，则进行调整



检查当前结点是否满足 根 \geq 左、右
若不满足，将当前结点与更大的一个孩子互换

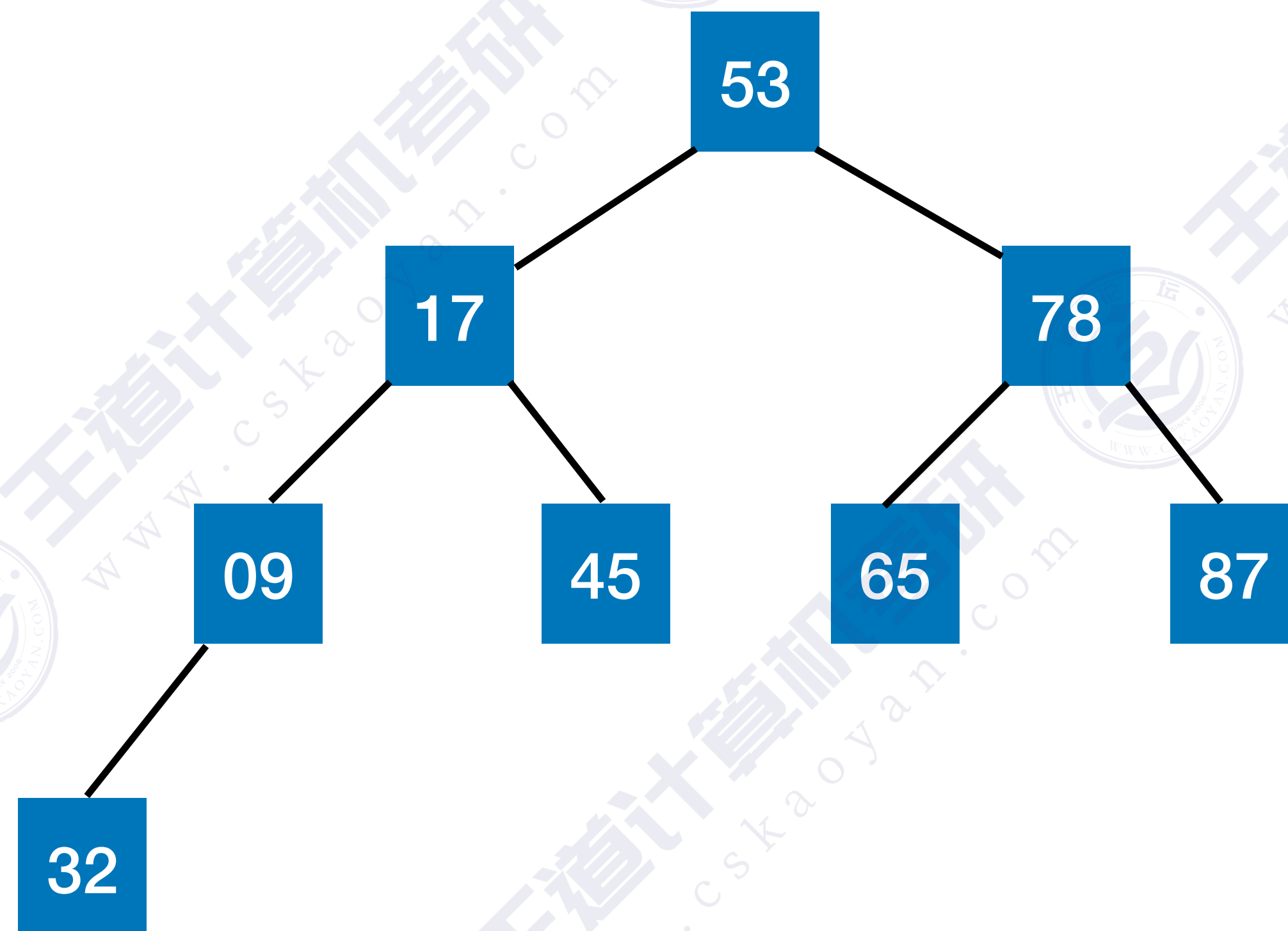
若元素互换破坏了下一级的堆，则采用相同的方法继续往下调整（小元素不断“下坠”）

- i 的左孩子 —— $2i$
- i 的右孩子 —— $2i+1$
- i 的父节点 —— $\lfloor i/2 \rfloor$

建立大根堆（代码）

初始序列

	53	17	78	09	45	65	87	32
0	1	2	3	4	5	6	7	8



//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--)  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k];  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++;  
        if(A[0]>=A[i]) break;  
        else{  
            A[k]=A[i];  
            k=i;  
        }  
    }  
    A[k]=A[0];  
}
```

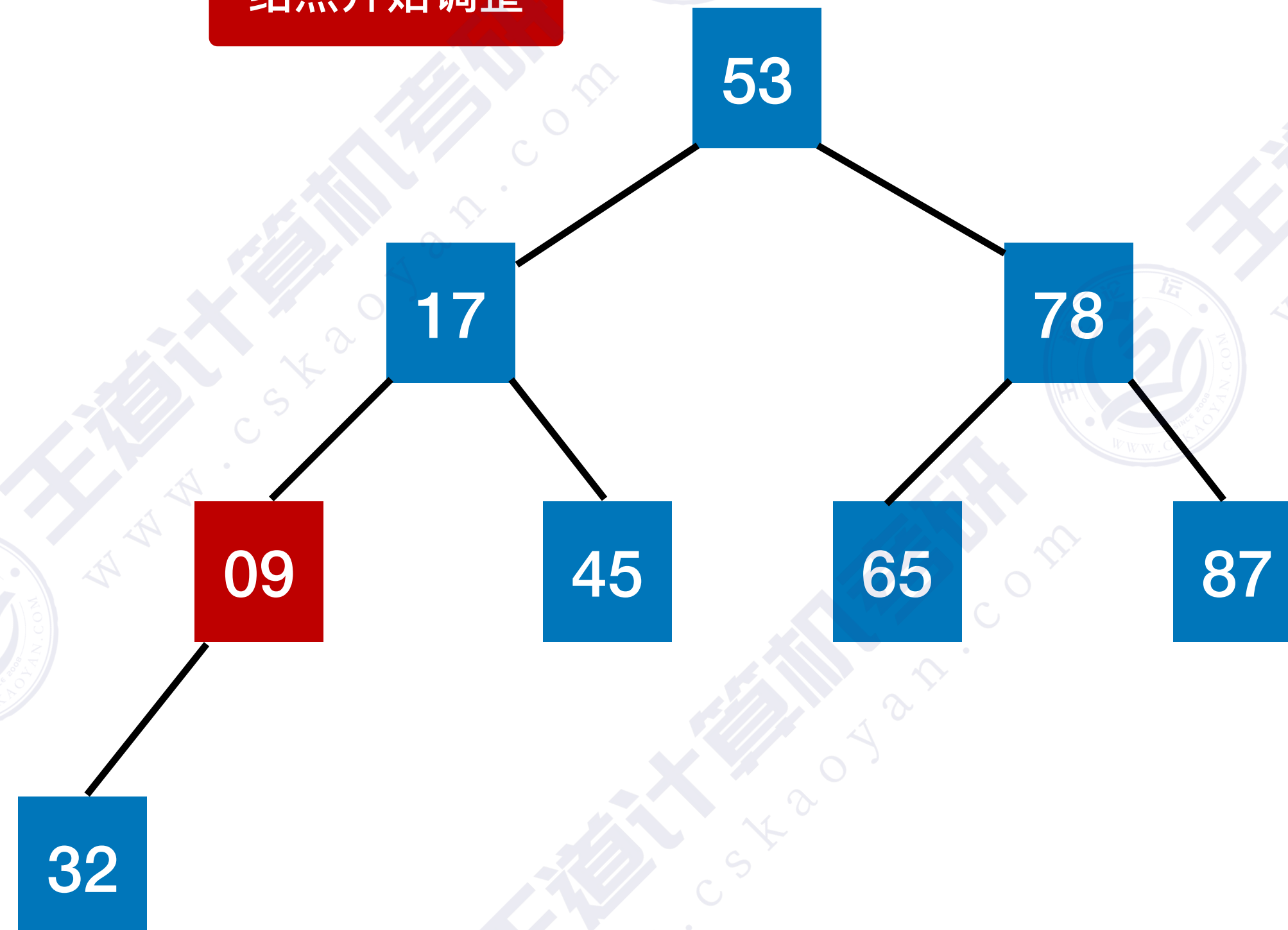

建立大根堆（代码）

初始序列

	53	17	78	09	45	65	87	32
0	1	2	3	4	5	6	7	8

从最底层的分支
结点开始调整

k



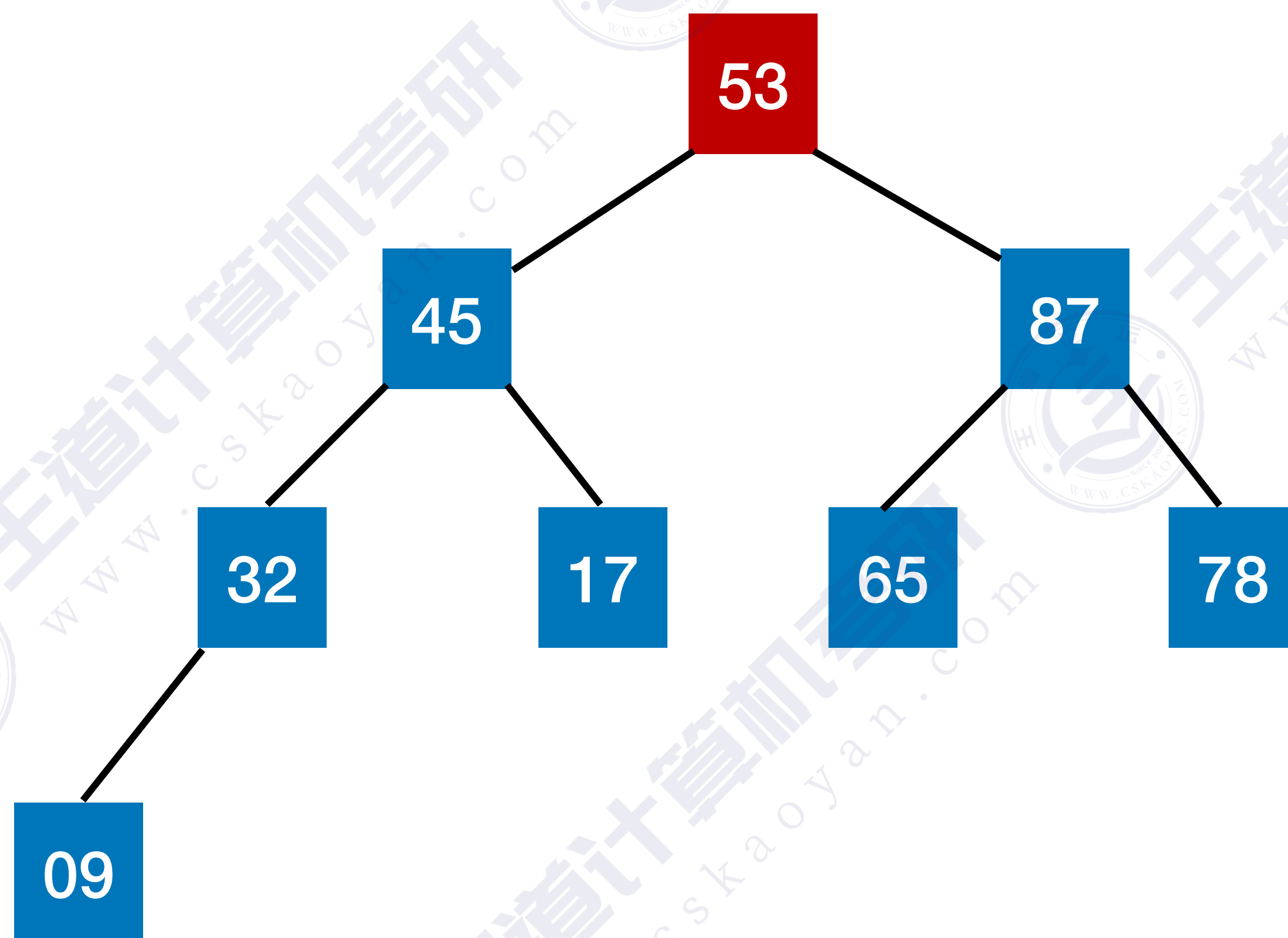
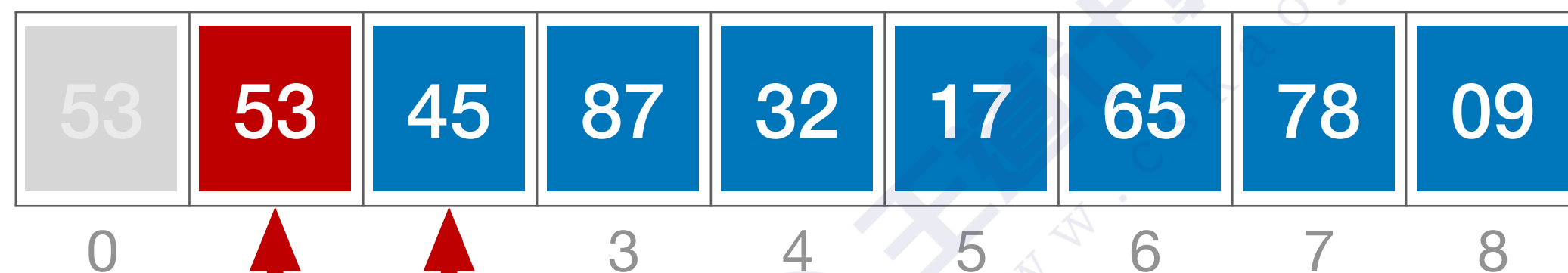
//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--)  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k];  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++;  
        if(A[0]>=A[i]) break;  
        else{  
            A[k]=A[i];  
            k=i;  
        }  
    }  
    A[k]=A[0];  
}
```

建立大根堆（代码）



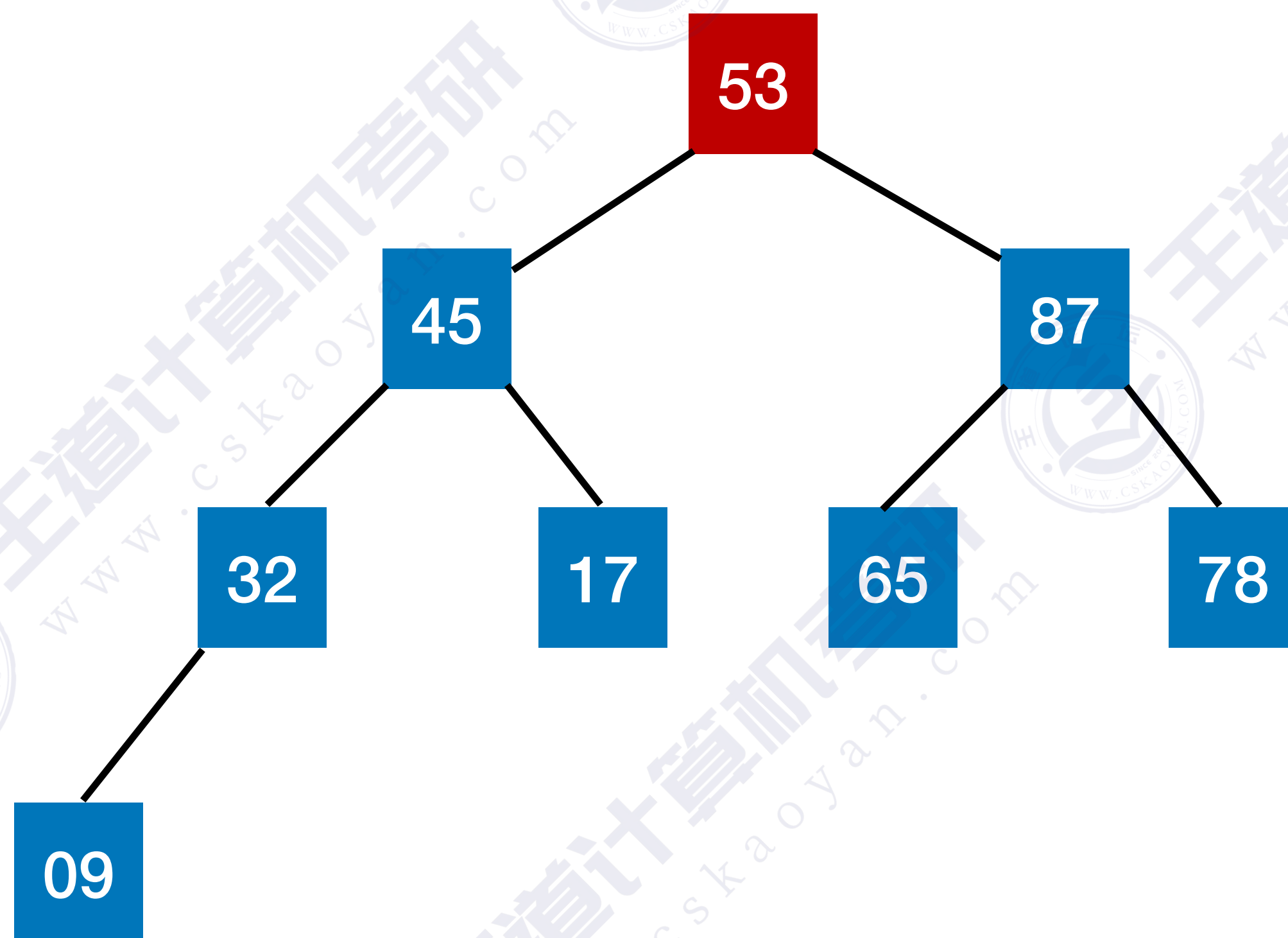
//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值，以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```


建立大根堆（代码）



//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

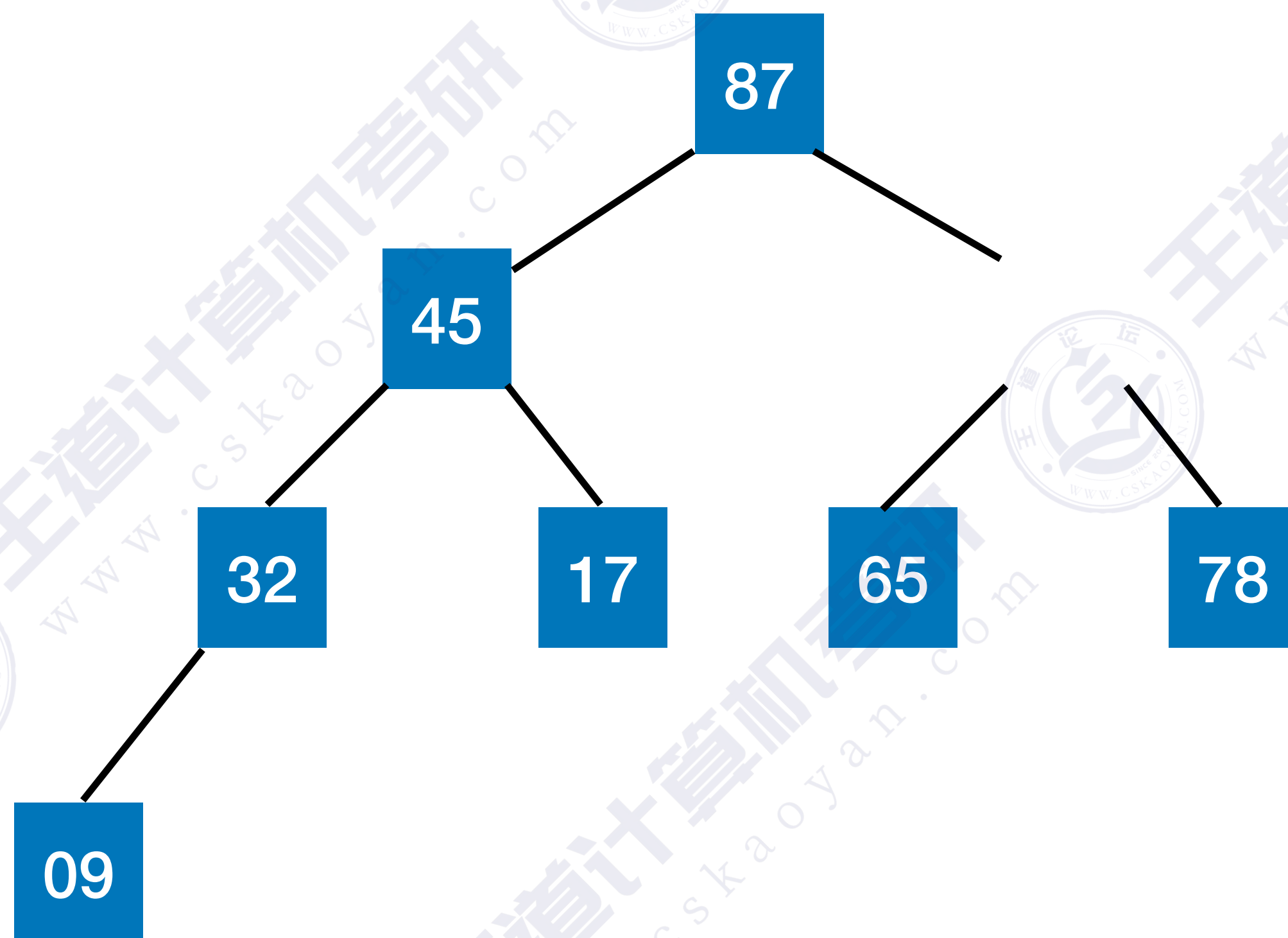
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值，以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```

建立大根堆（代码）

53	87	45		32	17	65	78	09
0	1	2	3	4	5	6	7	8

↑↑
k i



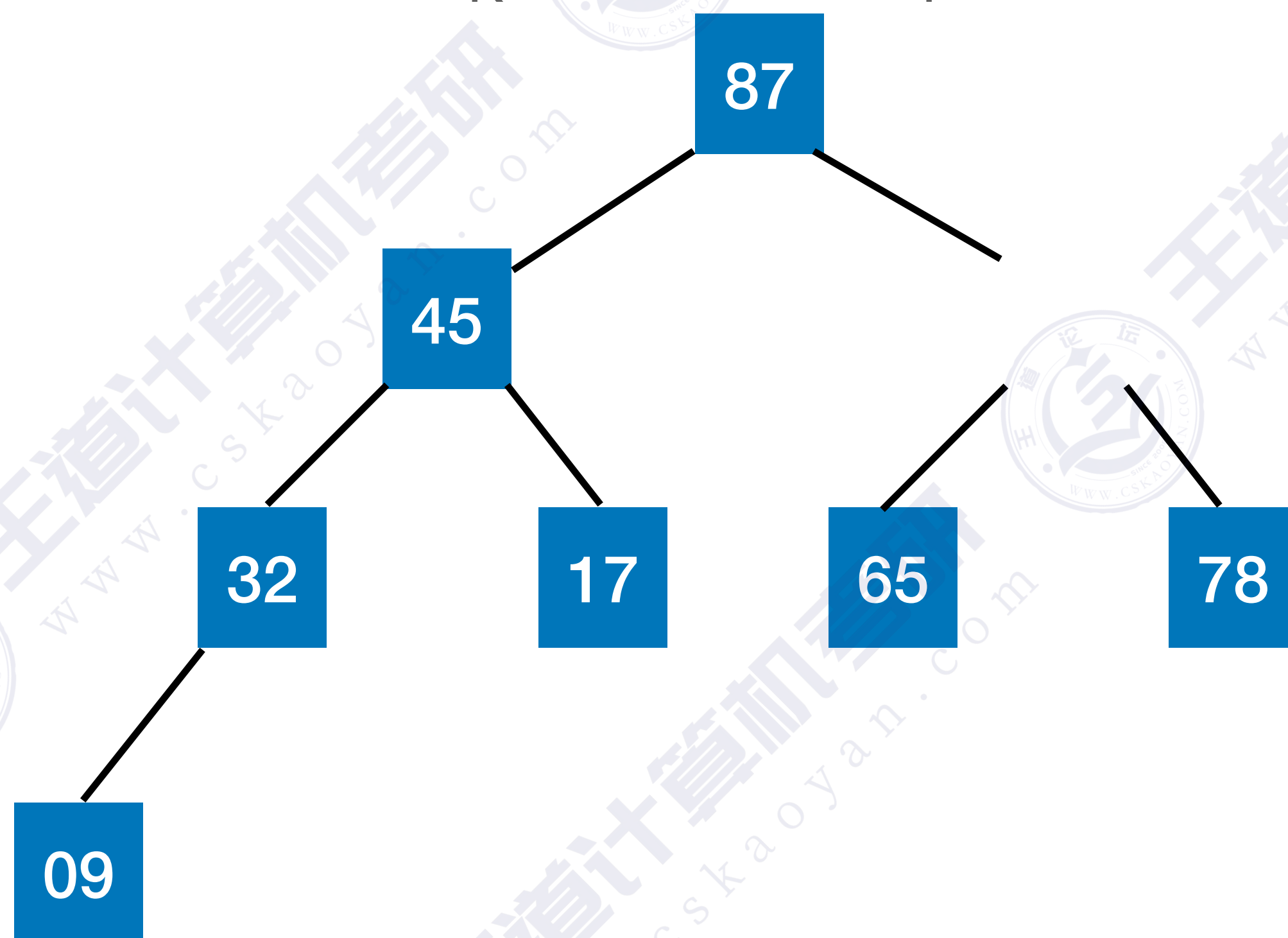
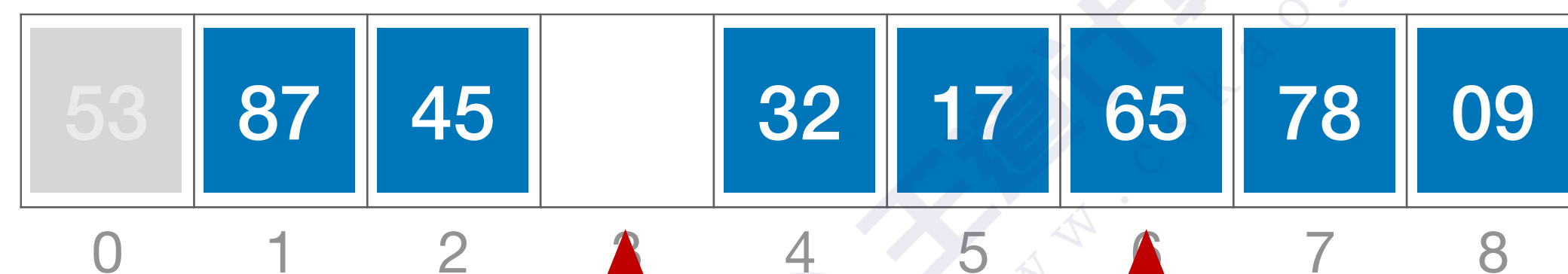
//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值，以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```


建立大根堆（代码）



//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值，以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```

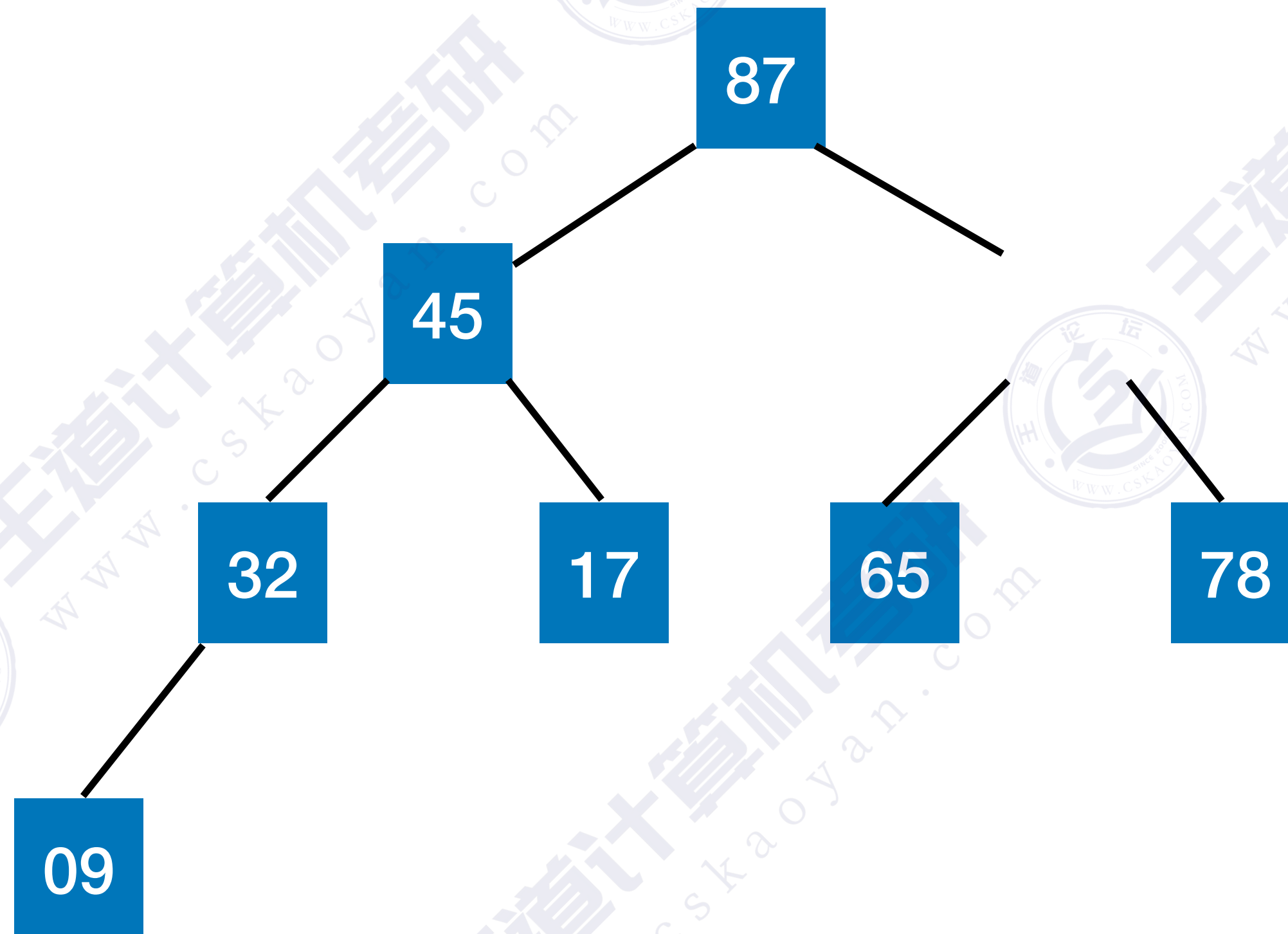
建立大根堆（代码）

右孩子更大

53	87	45		32	17	65	78	09
0	1	2	3	4	5	6	7	8

↑
k

↑
i



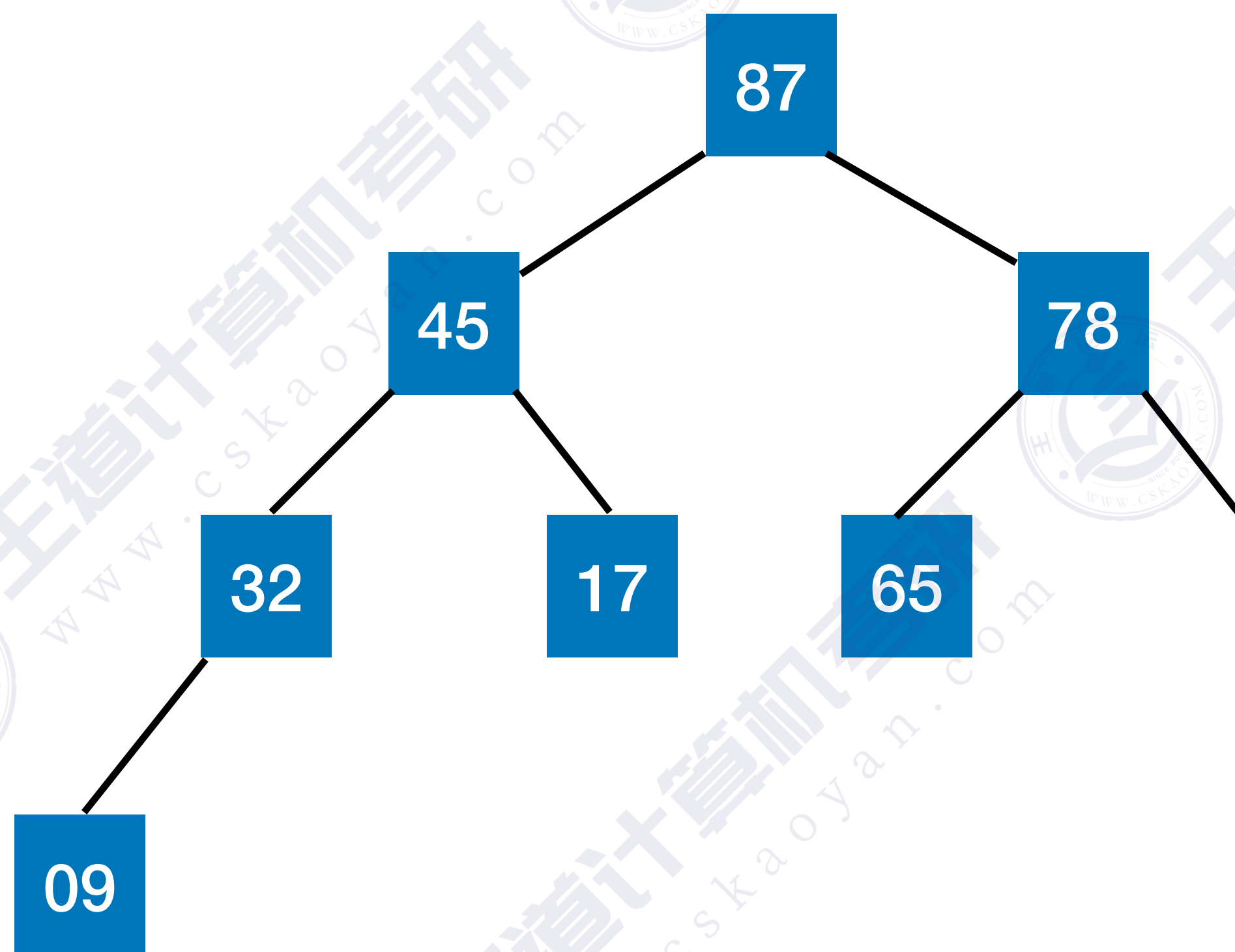
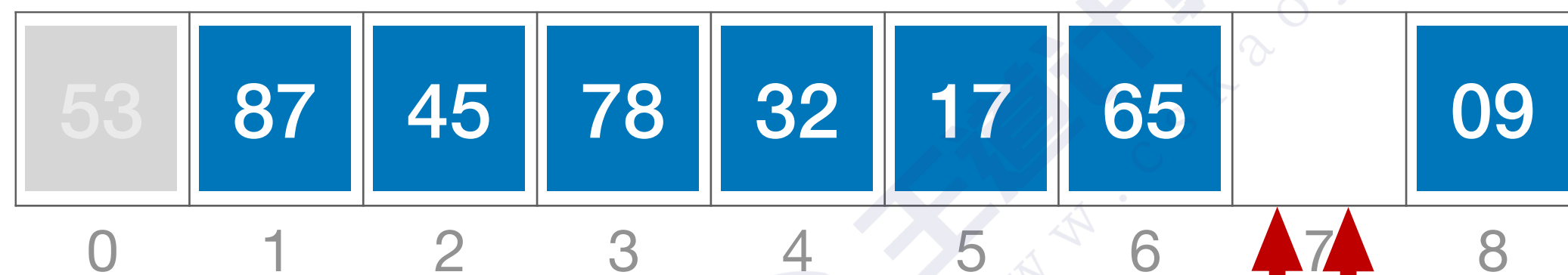
//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值，以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```


建立大根堆（代码）



//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

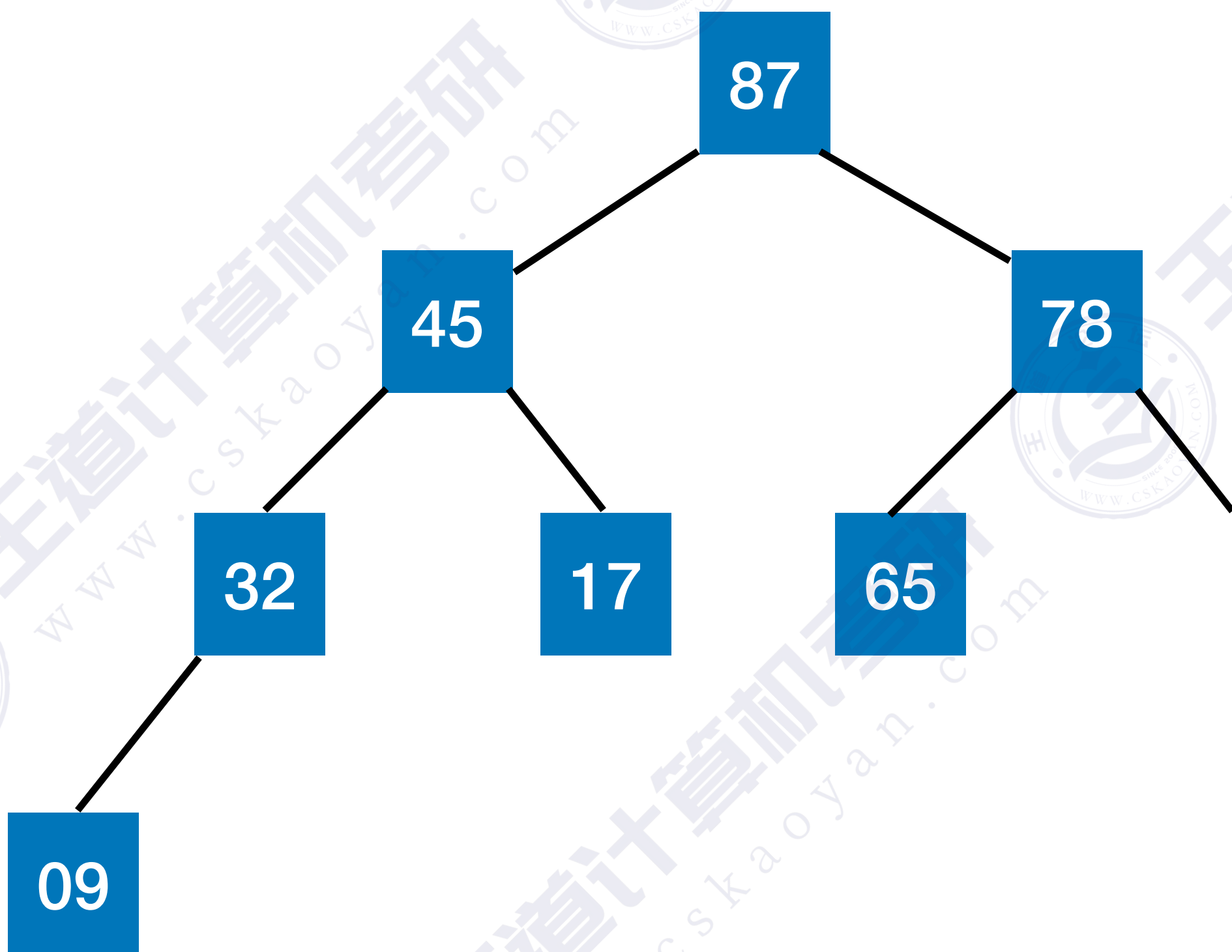
```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值，以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```

建立大根堆（代码）

53	87	45	78	32	17	65		09
0	1	2	3	4	5	6	7	8

↑
k

↑
i=14>len



//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--)  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//从后往前调整所有非终端结点

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k];  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++;  
        if(A[0]>=A[i]) break;  
        else{  
            A[k]=A[i];  
            k=i;  
        }  
    }  
    A[k]=A[0];  
}
```

//A[0]暂存子树的根结点

//沿key较大的子结点向下筛选

//取key较大的子结点的下标

//筛选结束

//将A[i]调整到双亲结点上

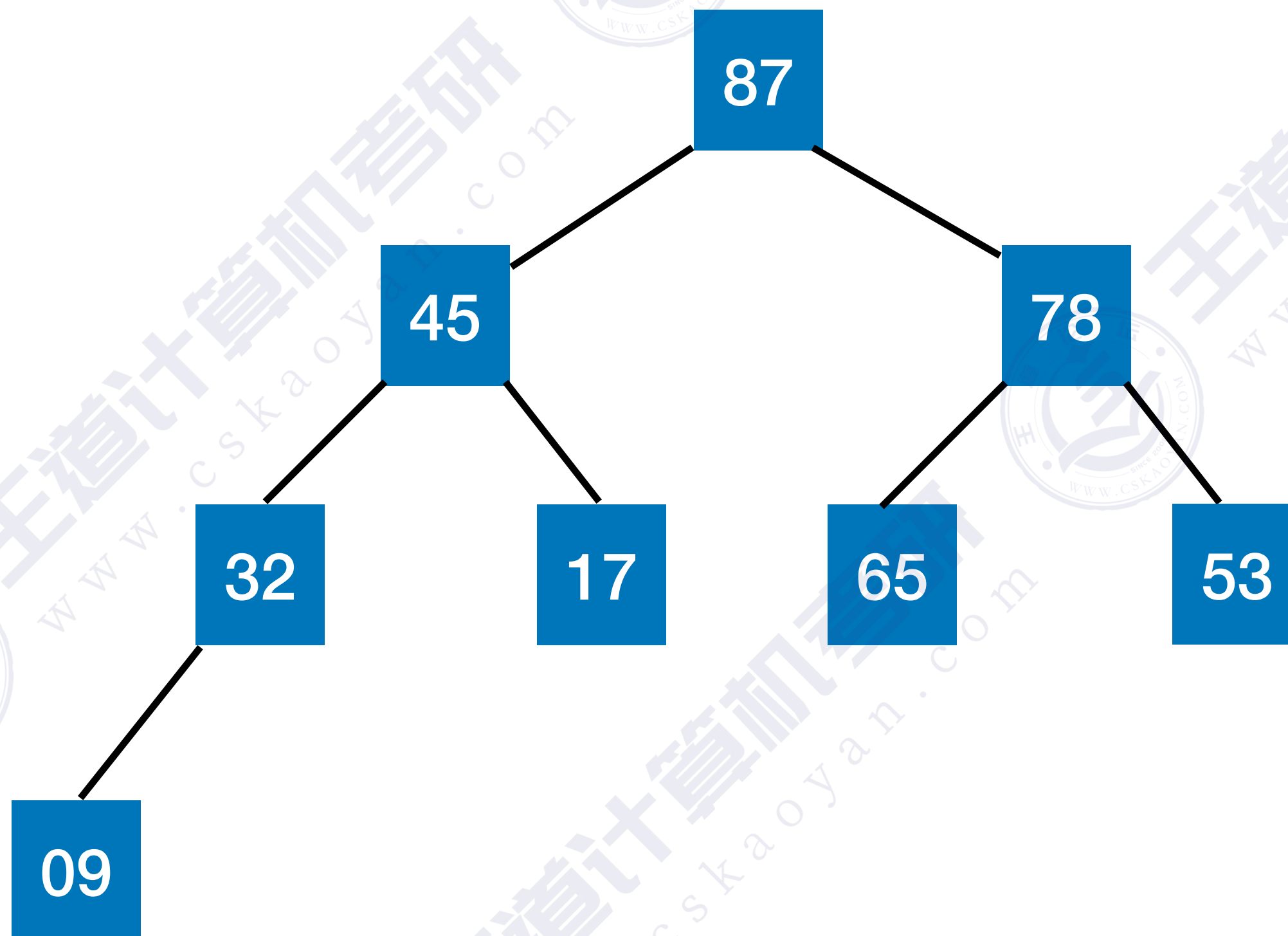
//修改k值，以便继续向下筛选

//被筛选结点的值放入最终位置

建立大根堆（代码）

	87	45	78	32	17	65	53	09
0	1	2	3	4	5	6	7	8

k



//建立大根堆

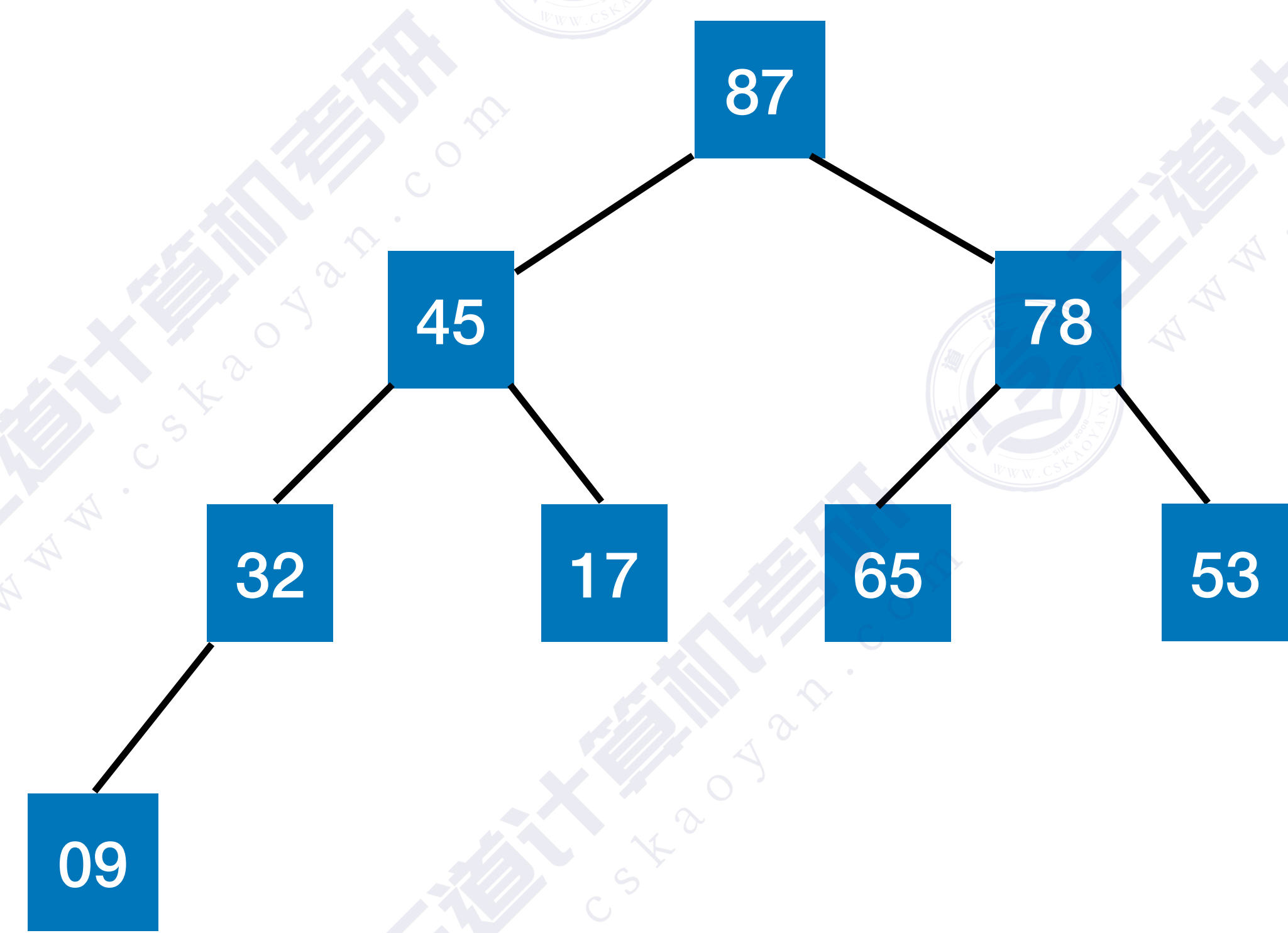
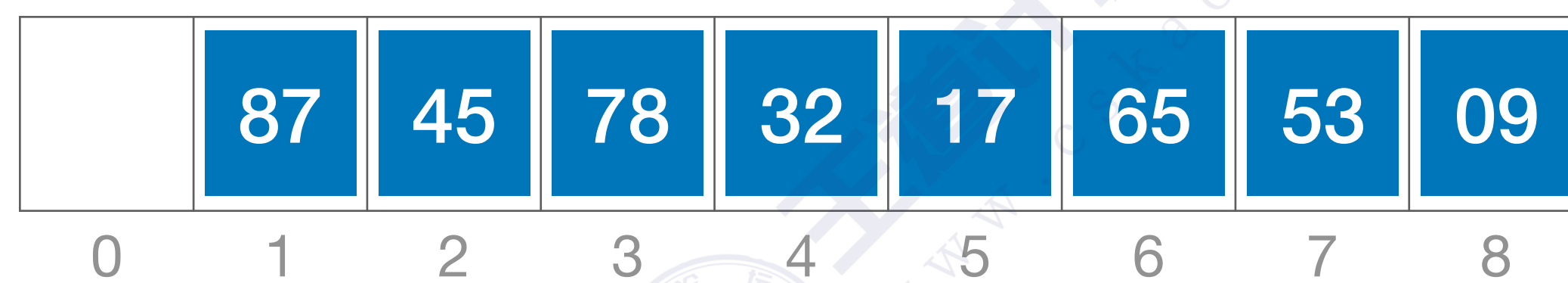
```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值，以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```

基于大根堆进行排序

大根堆

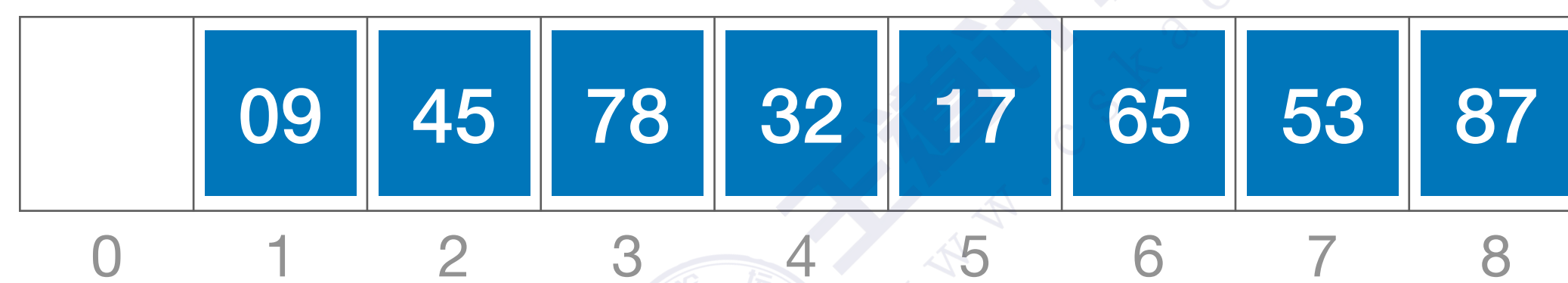


选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

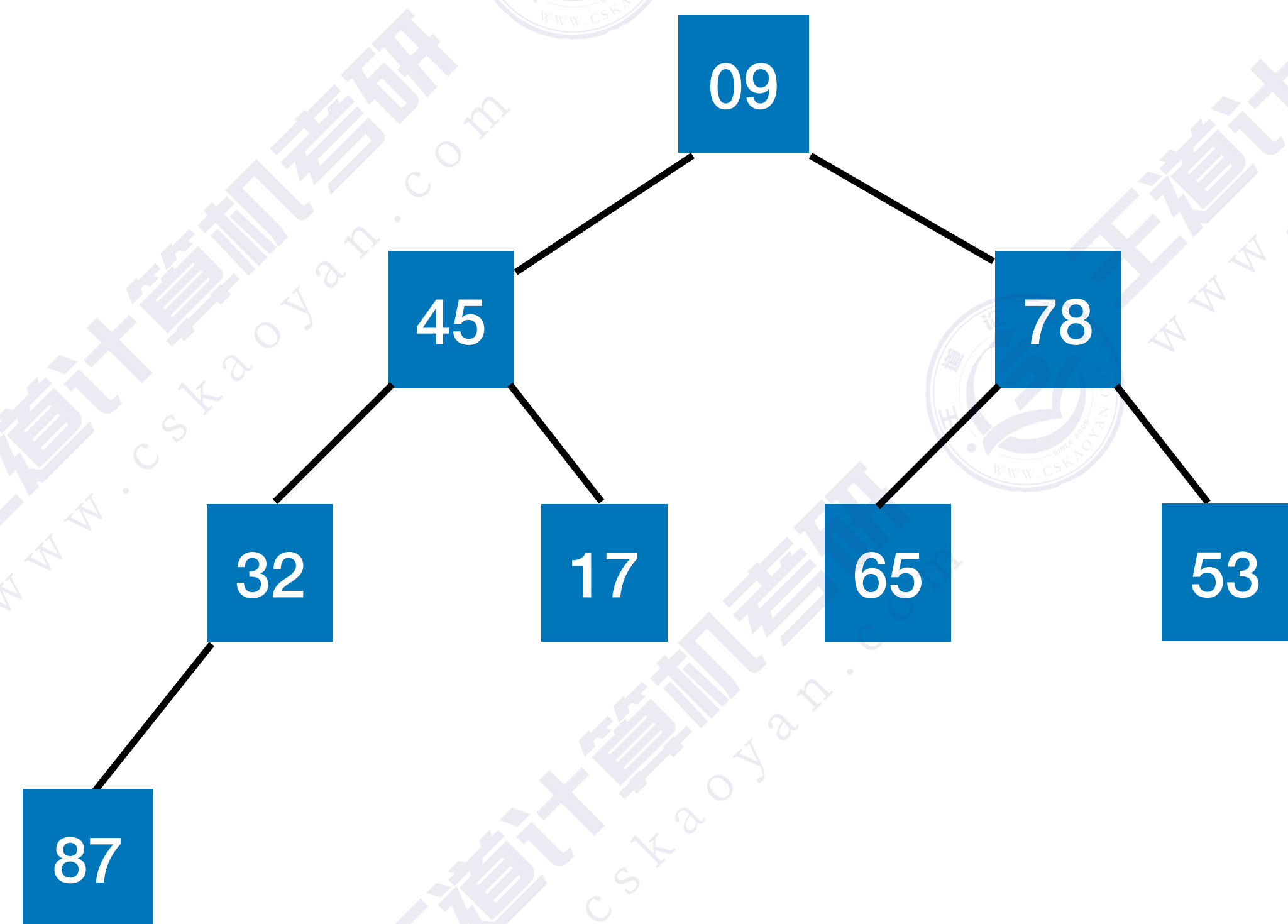
基于大根堆进行排序

大根堆



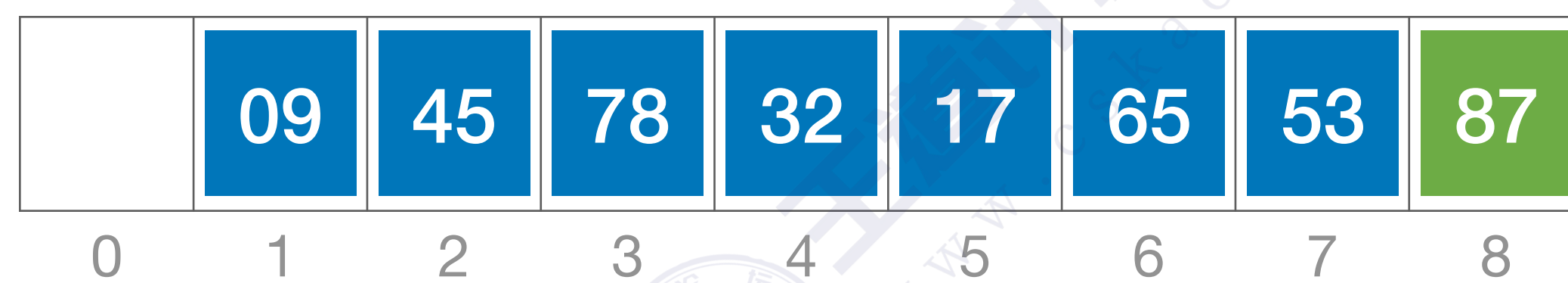
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）



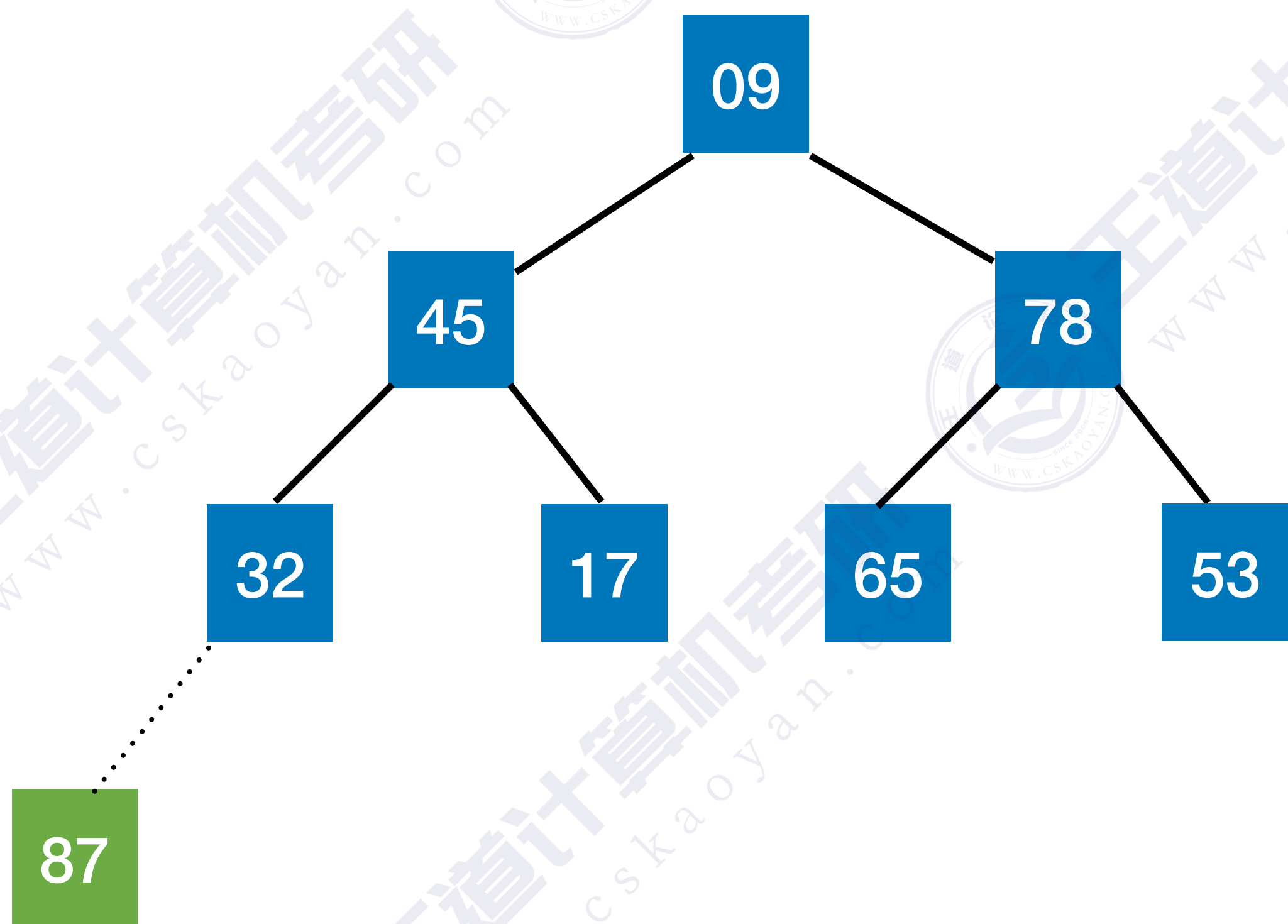
基于大根堆进行排序

大根堆



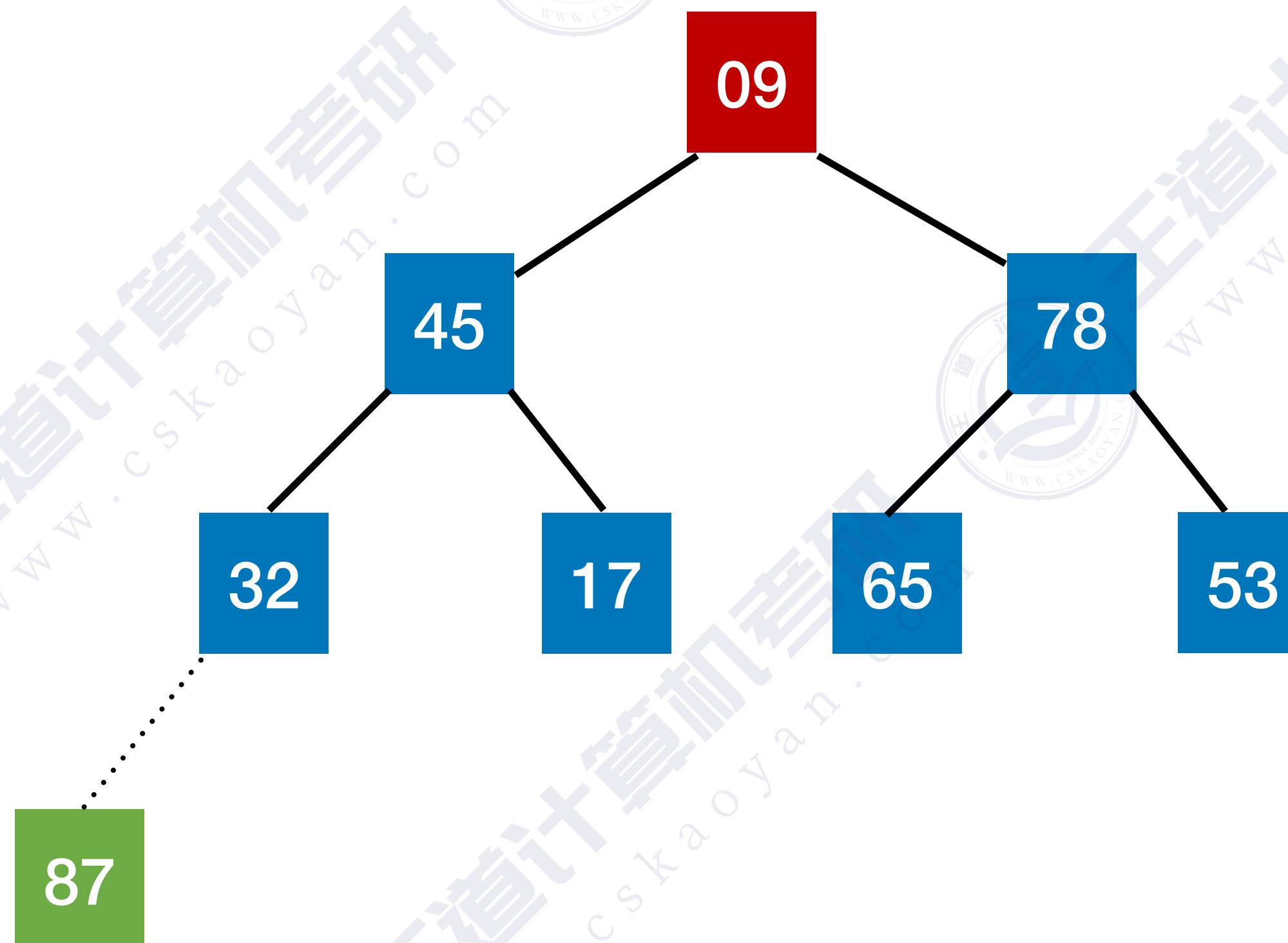
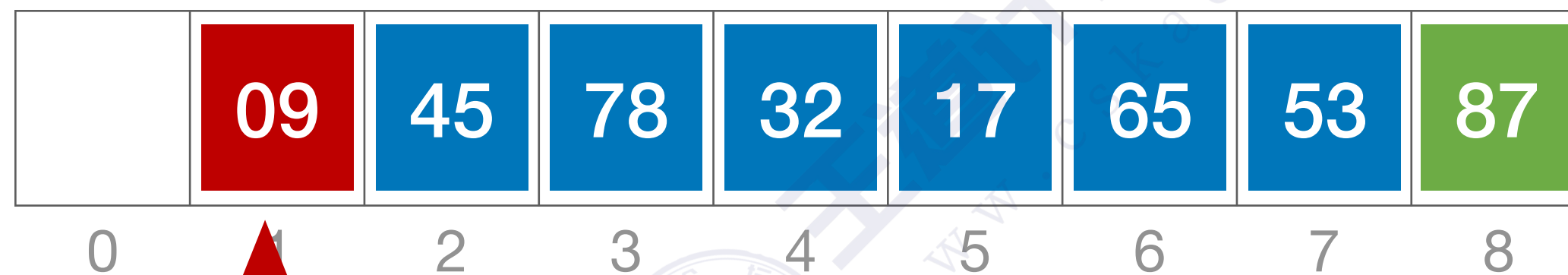
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）



基于大根堆进行排序

大根堆



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

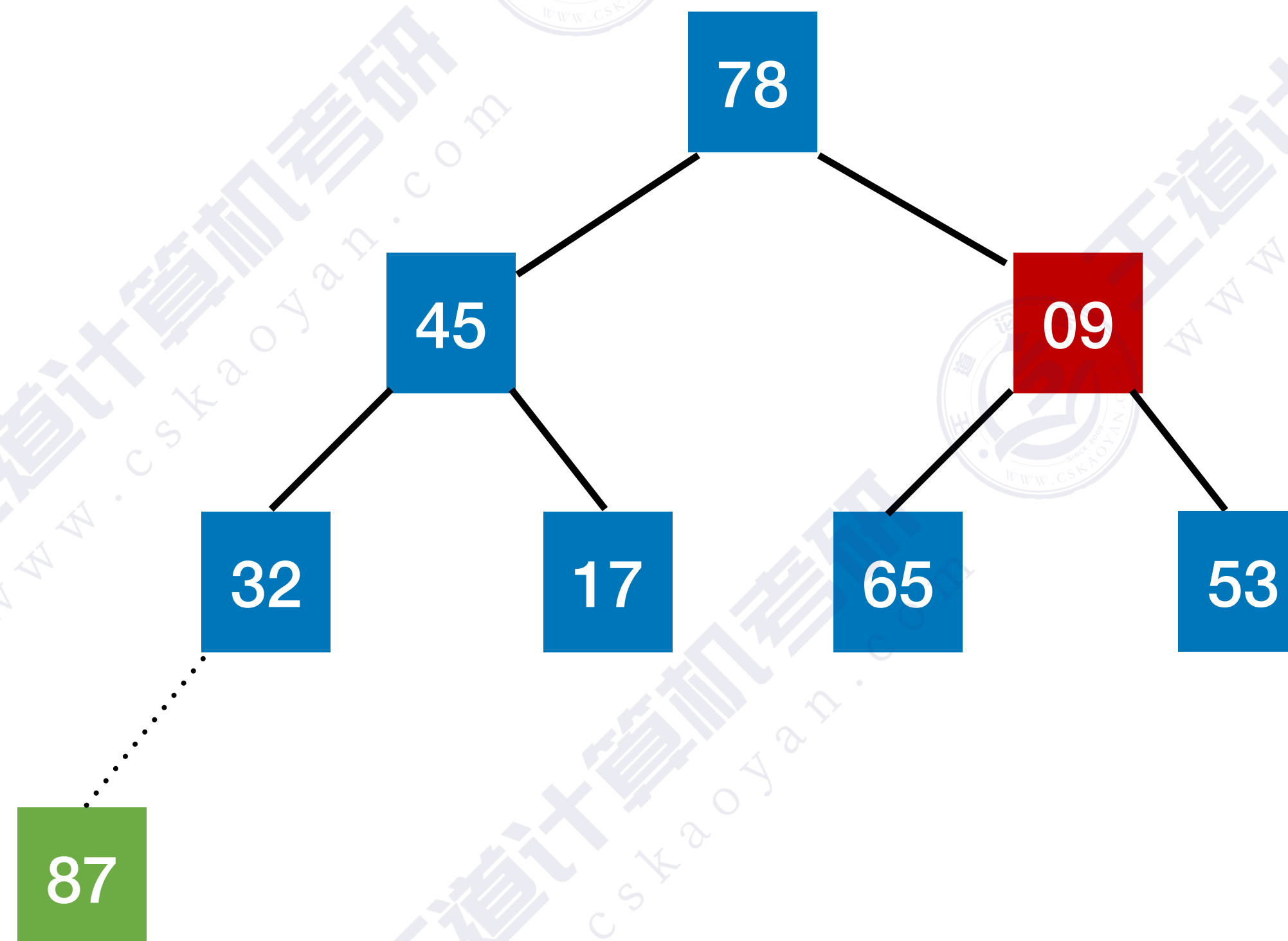
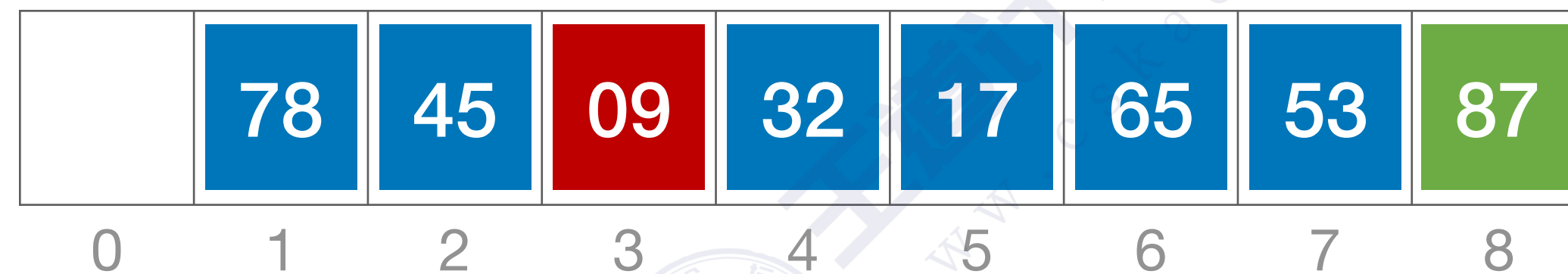
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

`void HeadAdjust(int A[],int k,int len)`

len=7

基于大根堆进行排序

大根堆



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

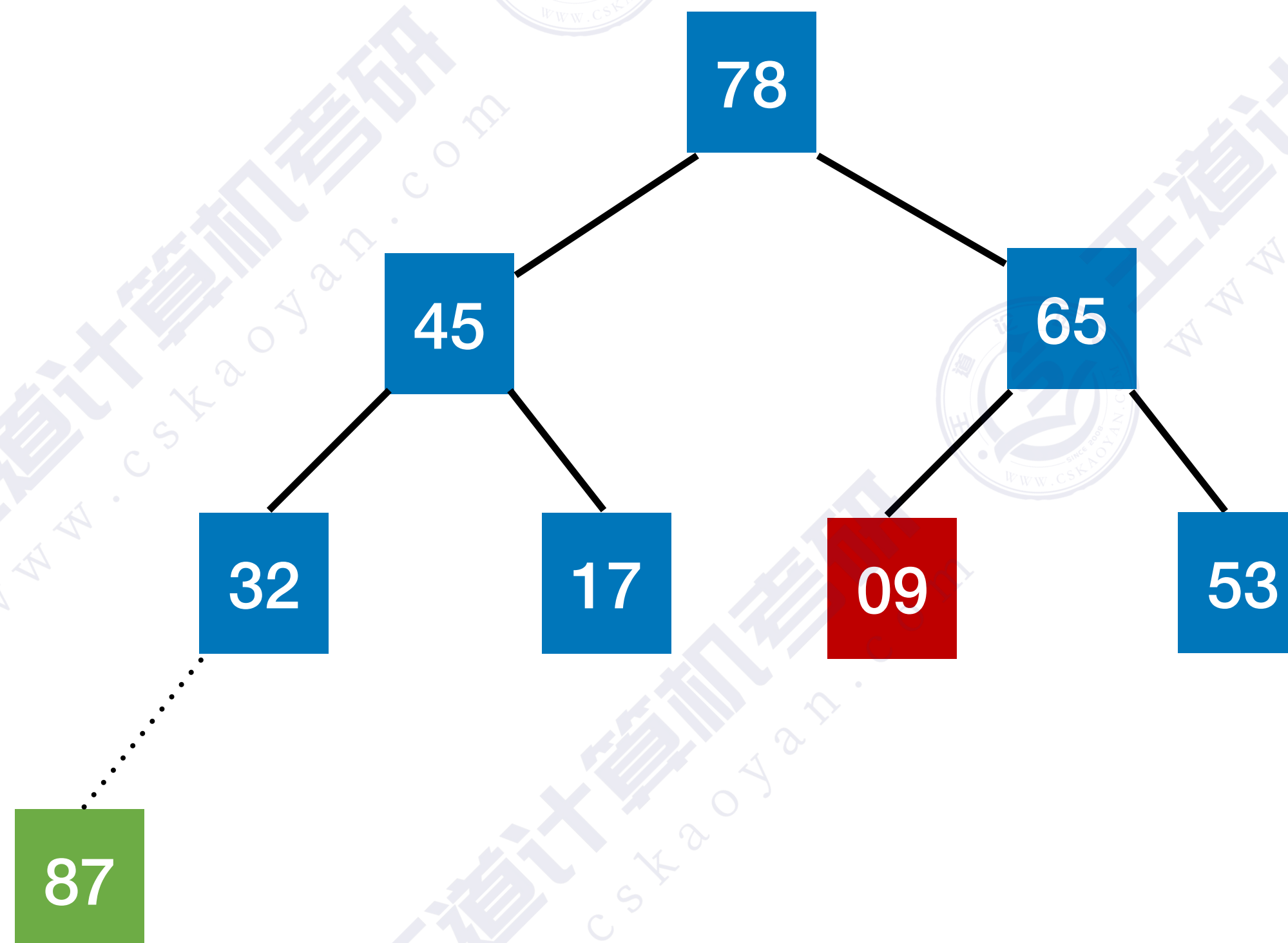
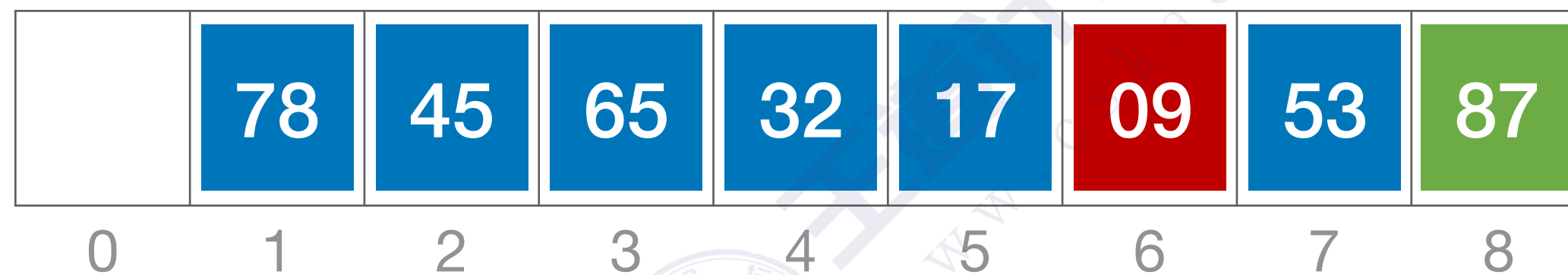
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

`void HeadAdjust(int A[],int k,int len)`

`len=7`

基于大根堆进行排序

大根堆



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

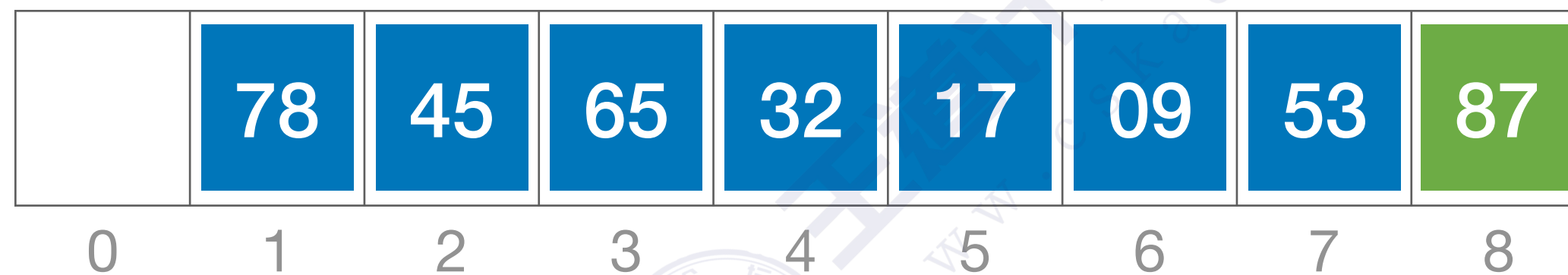
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

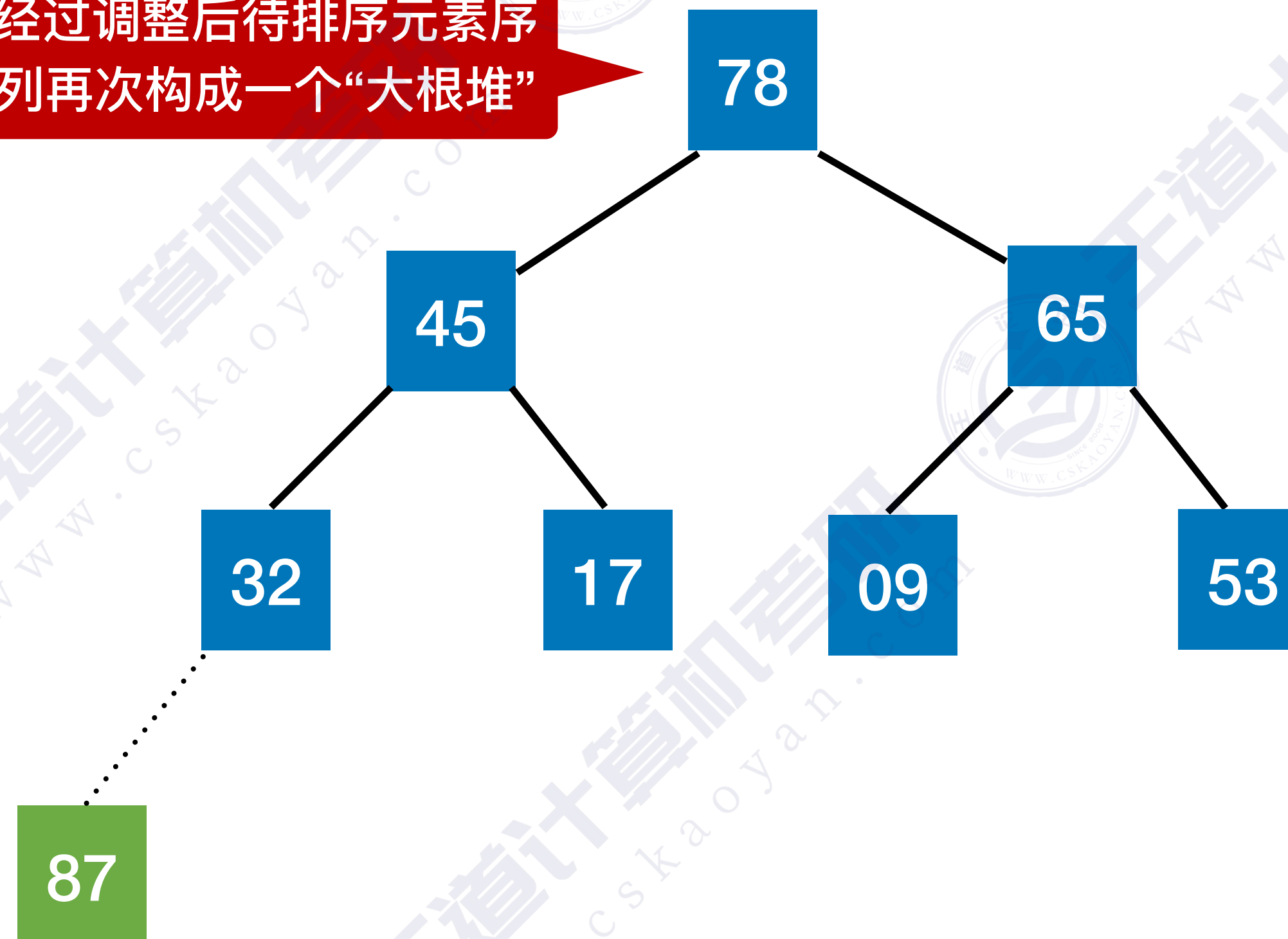
len=7

基于大根堆进行排序

大根堆



经过调整后待排序元素序列再次构成一个“大根堆”



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

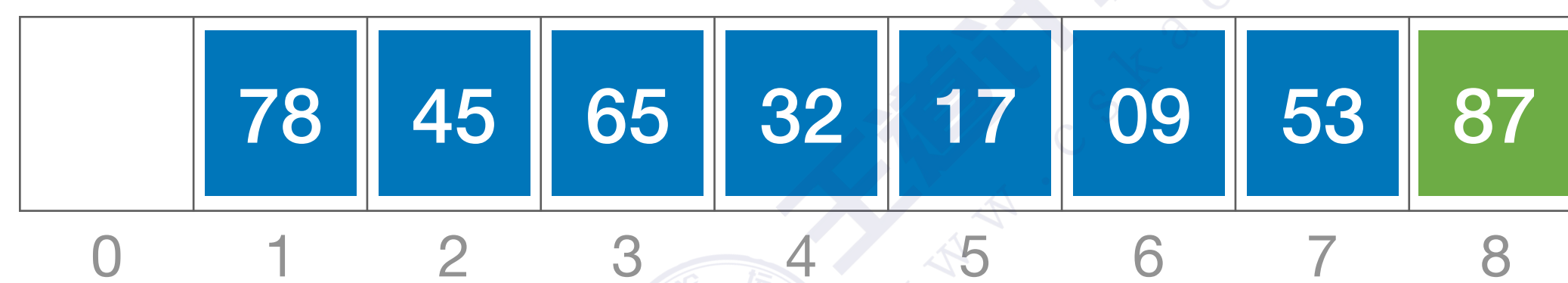
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

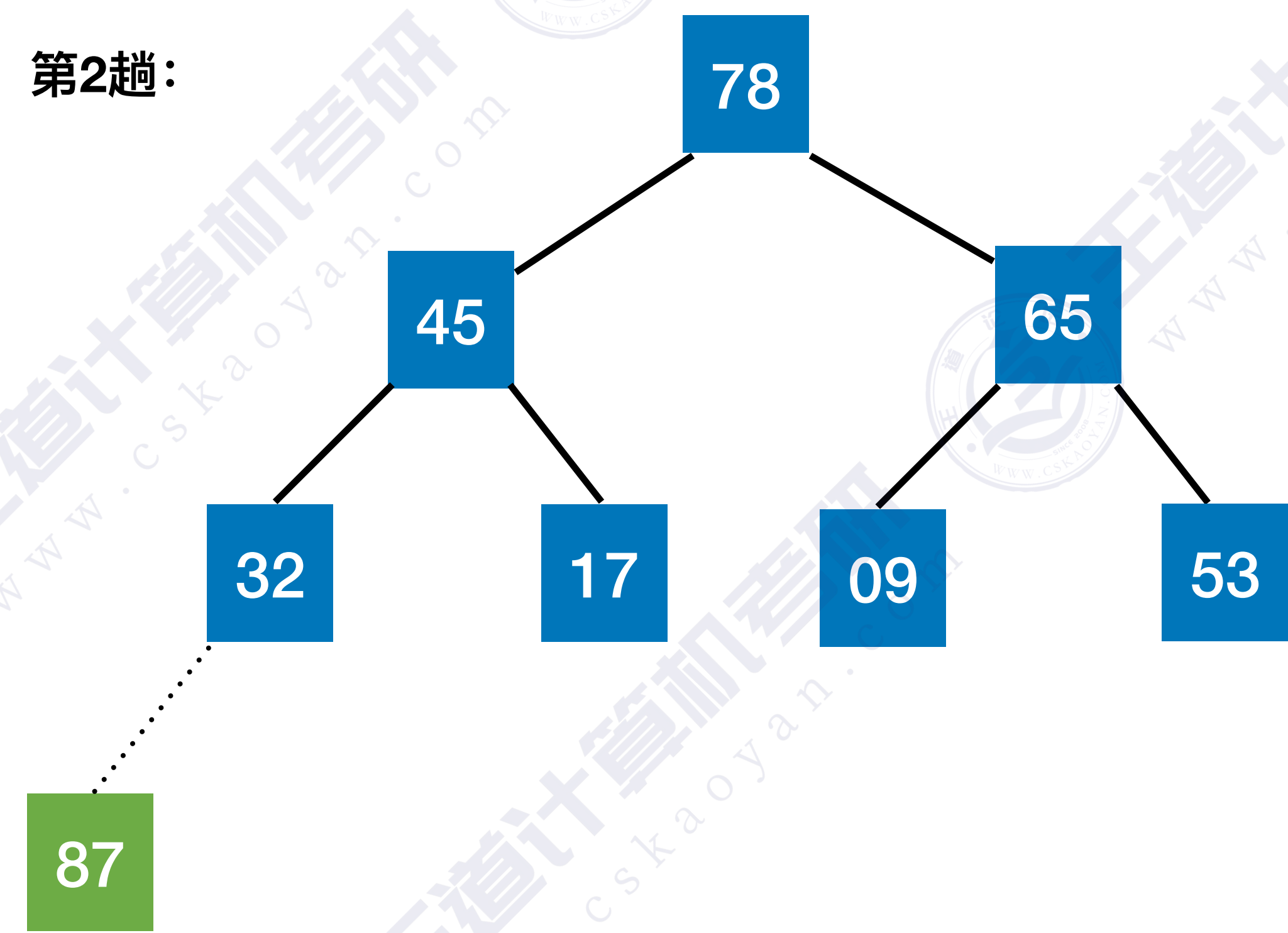
len=7

基于大根堆进行排序

大根堆



第2趟:



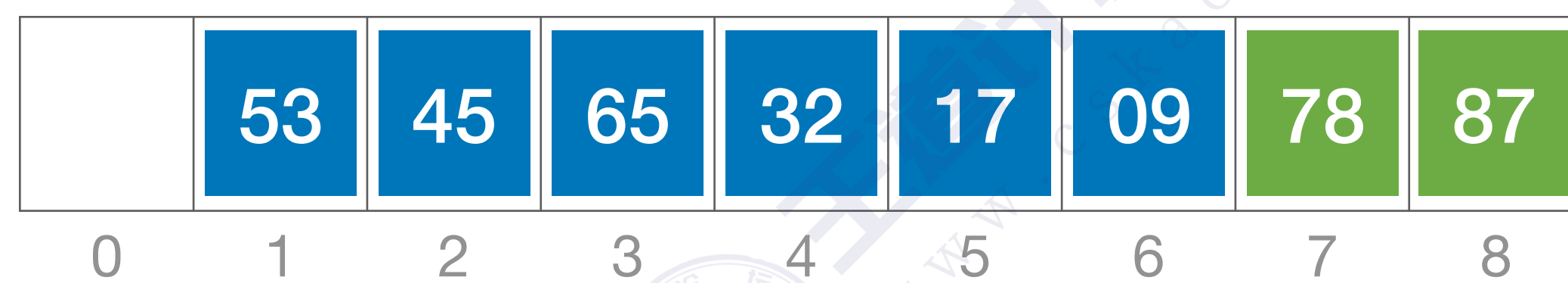
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

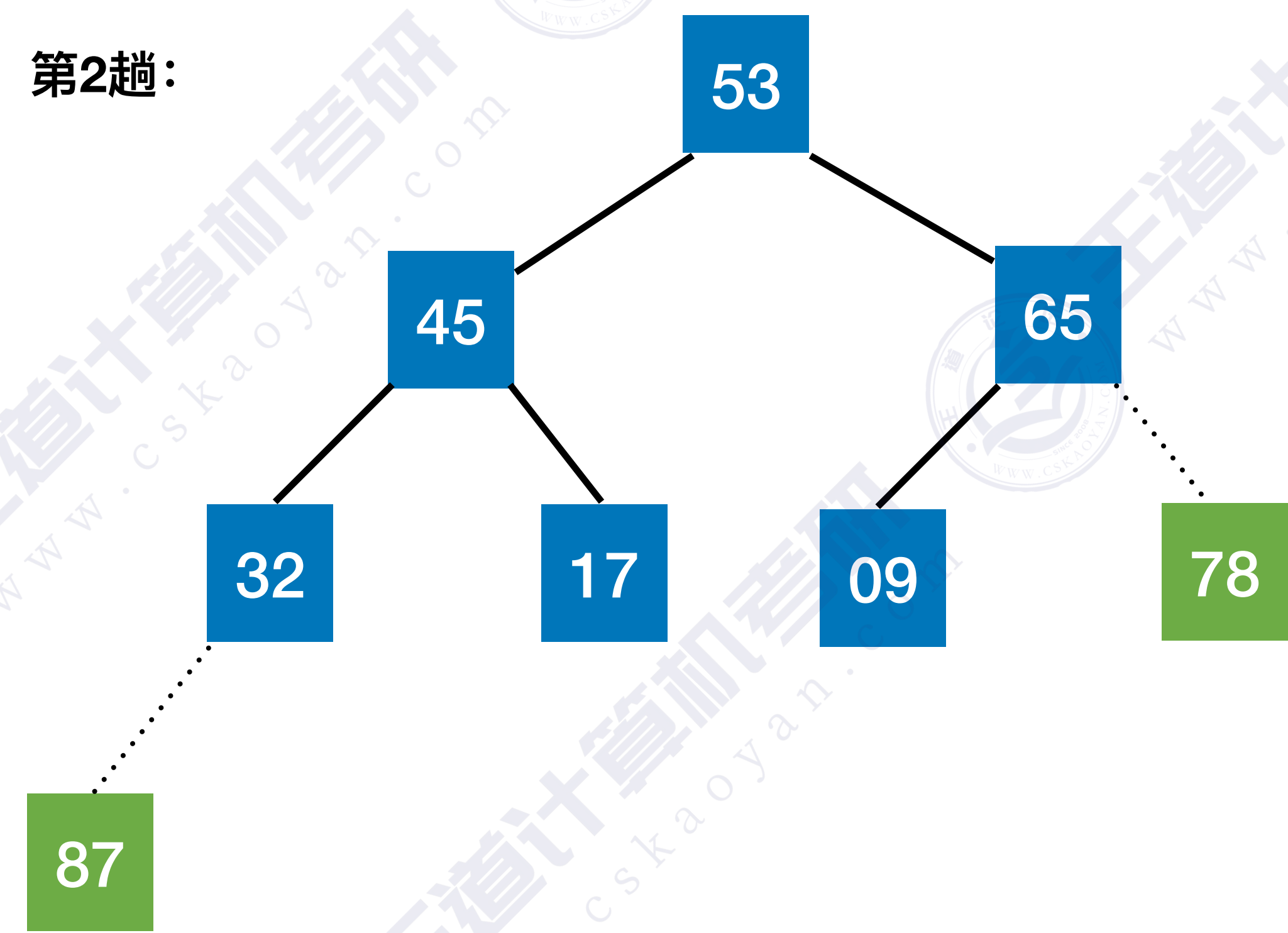
并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

基于大根堆进行排序

大根堆



第2趟:



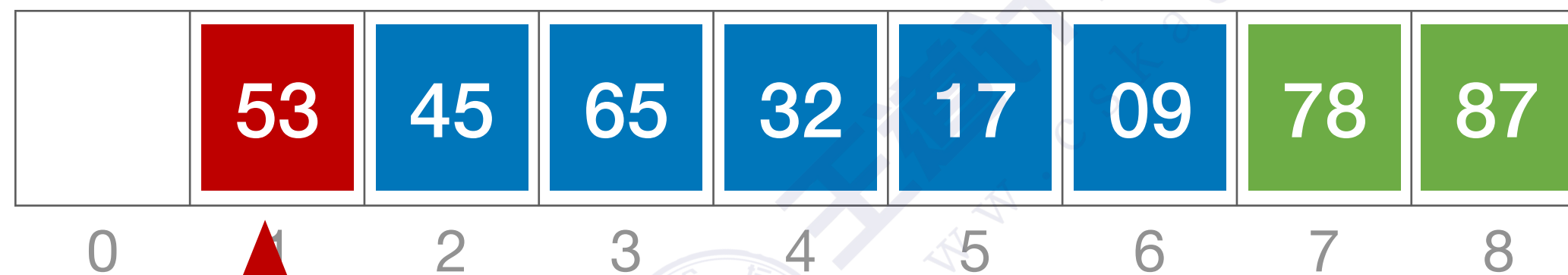
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列
(与待排序序列中的最后一个元素交换)

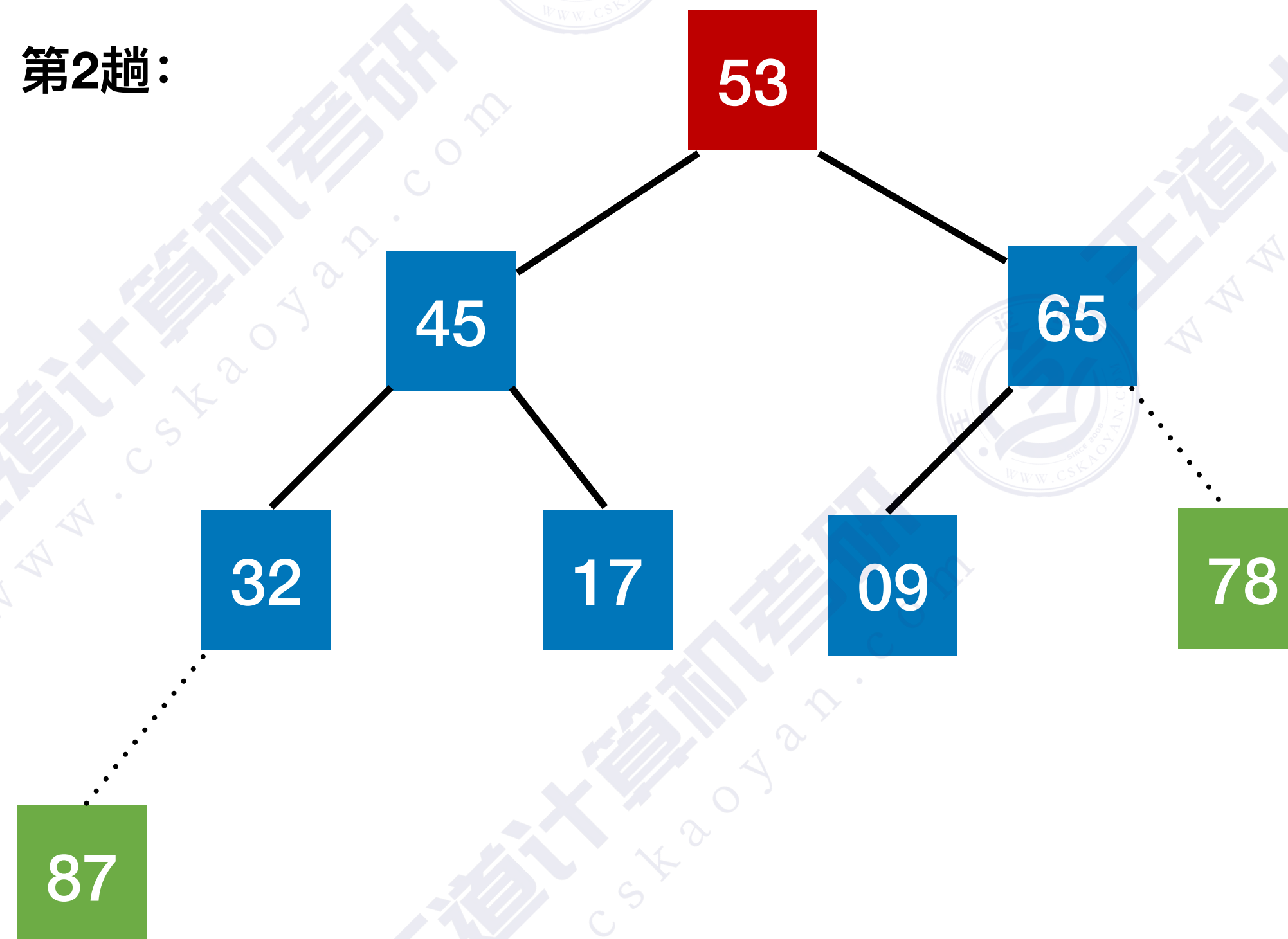
并将待排序元素序列再次调整为大根堆
(小元素不断“下坠”)

基于大根堆进行排序

大根堆



第2趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

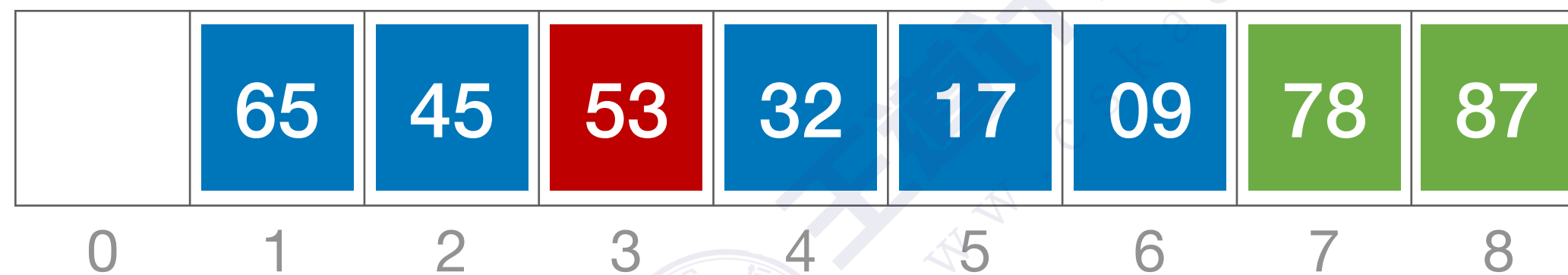
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

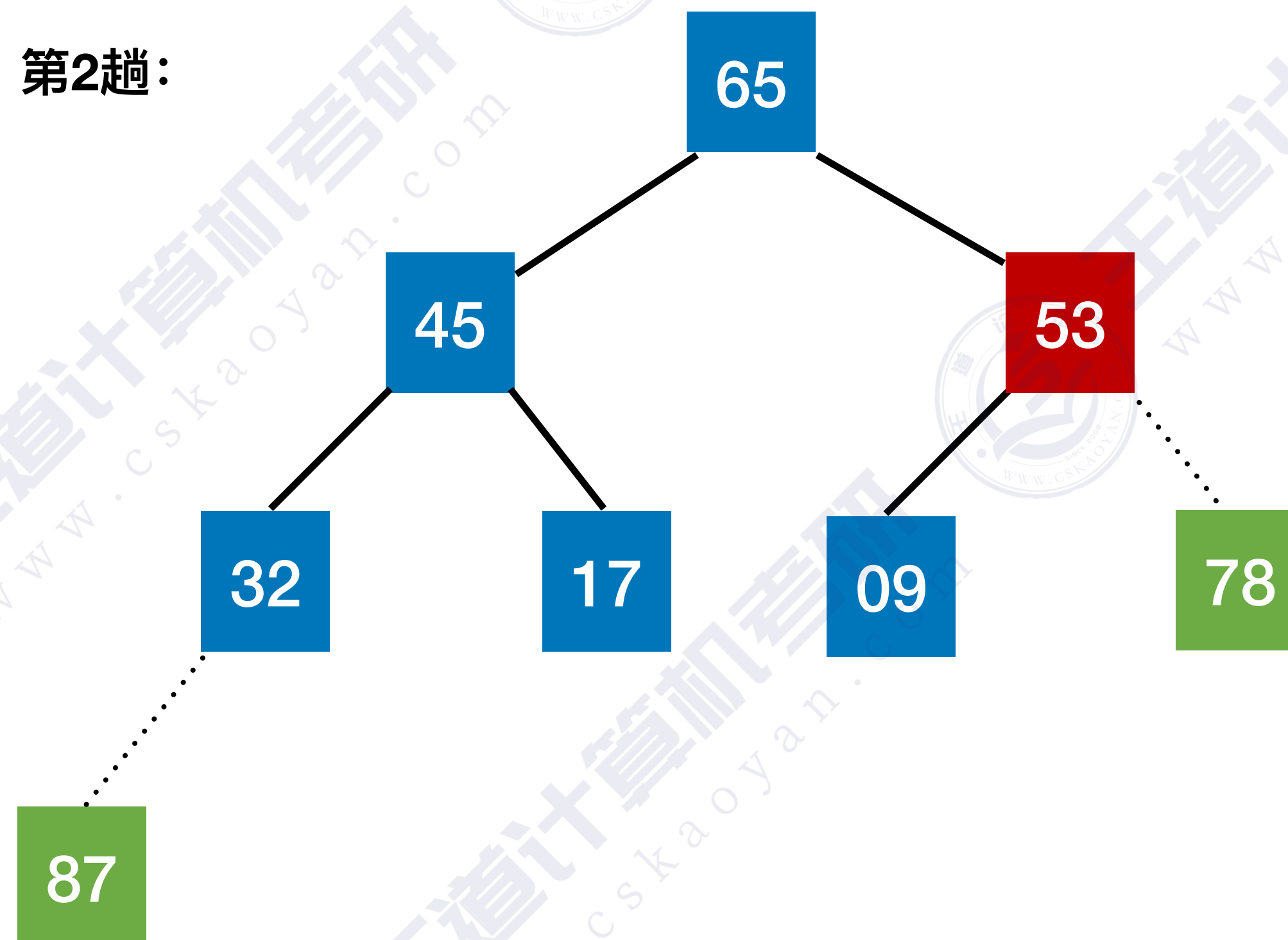
len=6

基于大根堆进行排序

大根堆



第2趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

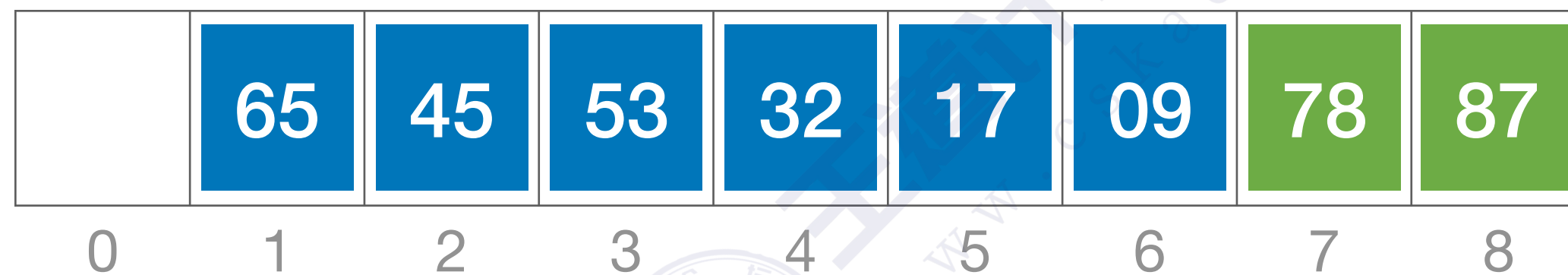
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

`void HeadAdjust(int A[],int k,int len)`

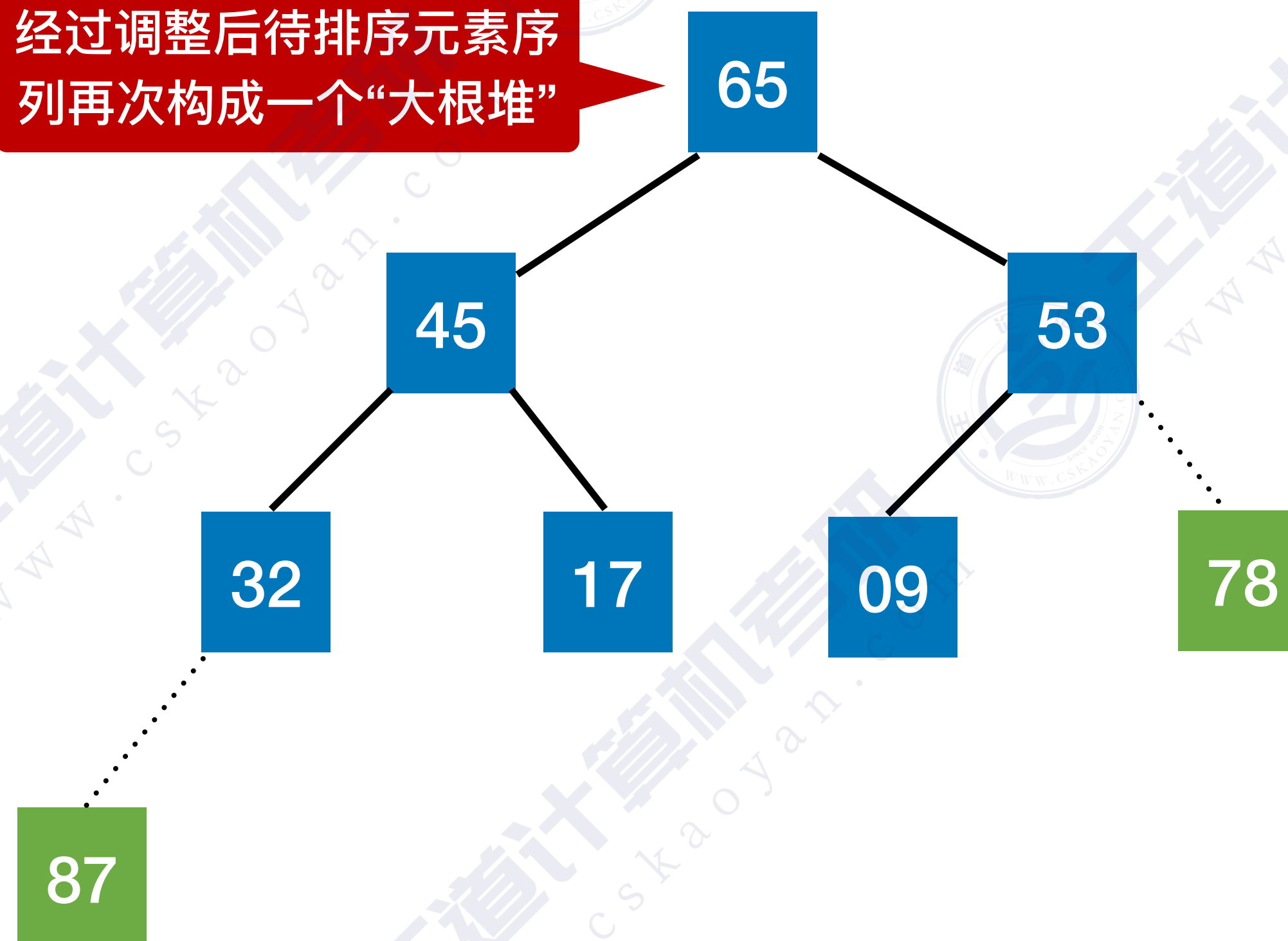
`len=6`

基于大根堆进行排序

大根堆



经过调整后待排序元素序列再次构成一个“大根堆”



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

`void HeadAdjust(int A[],int k,int len)`

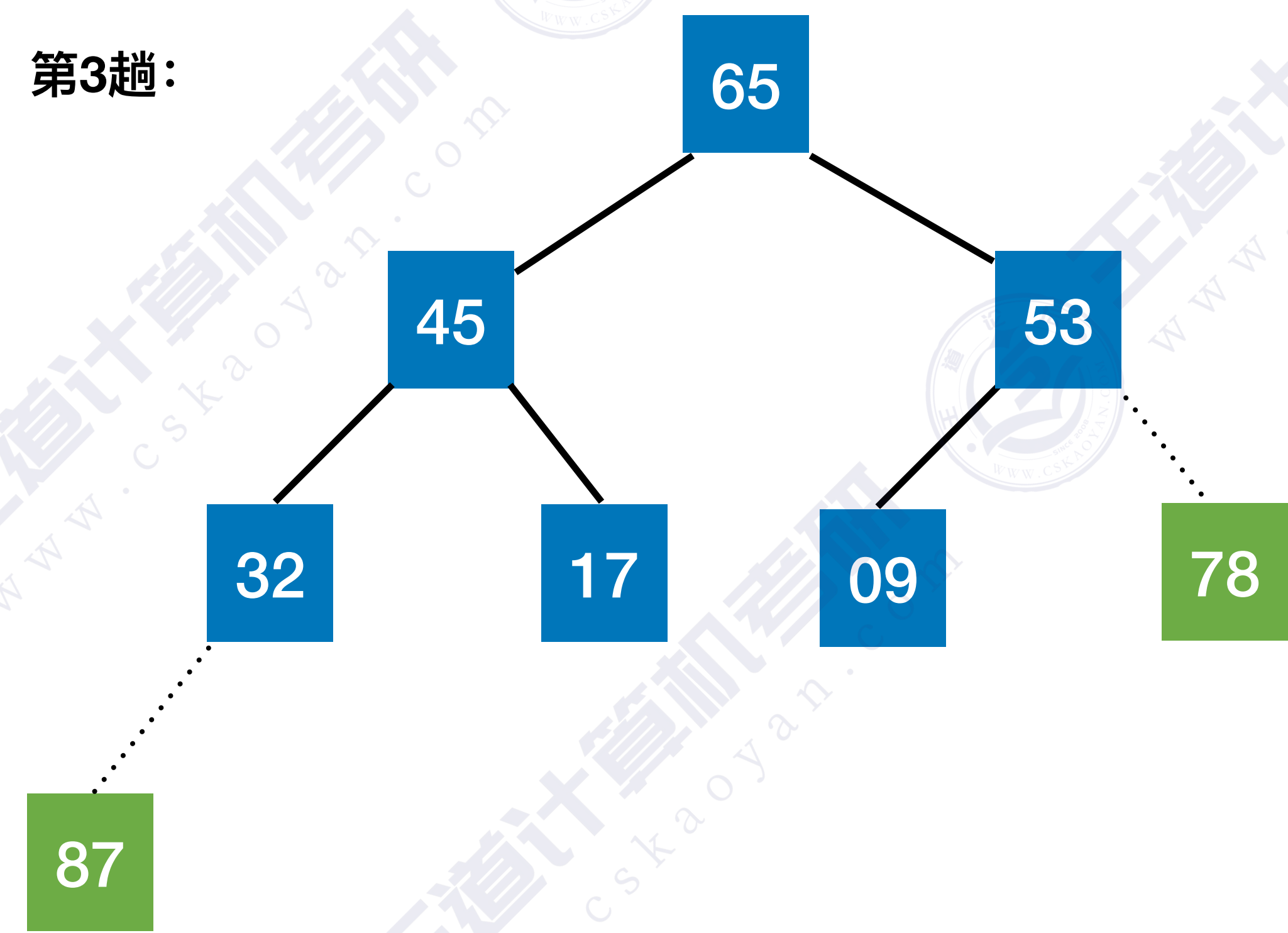
`len=6`

基于大根堆进行排序

大根堆



第3趟:



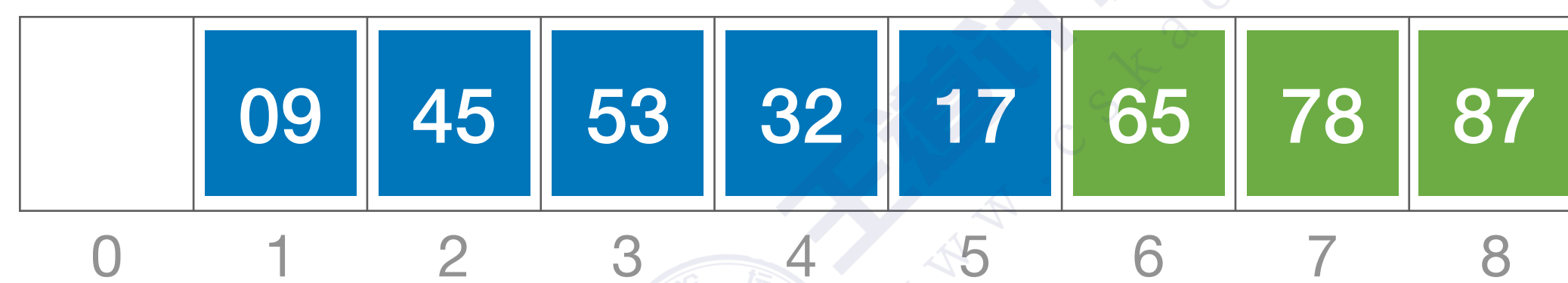
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列
(与待排序序列中的最后一个元素交换)

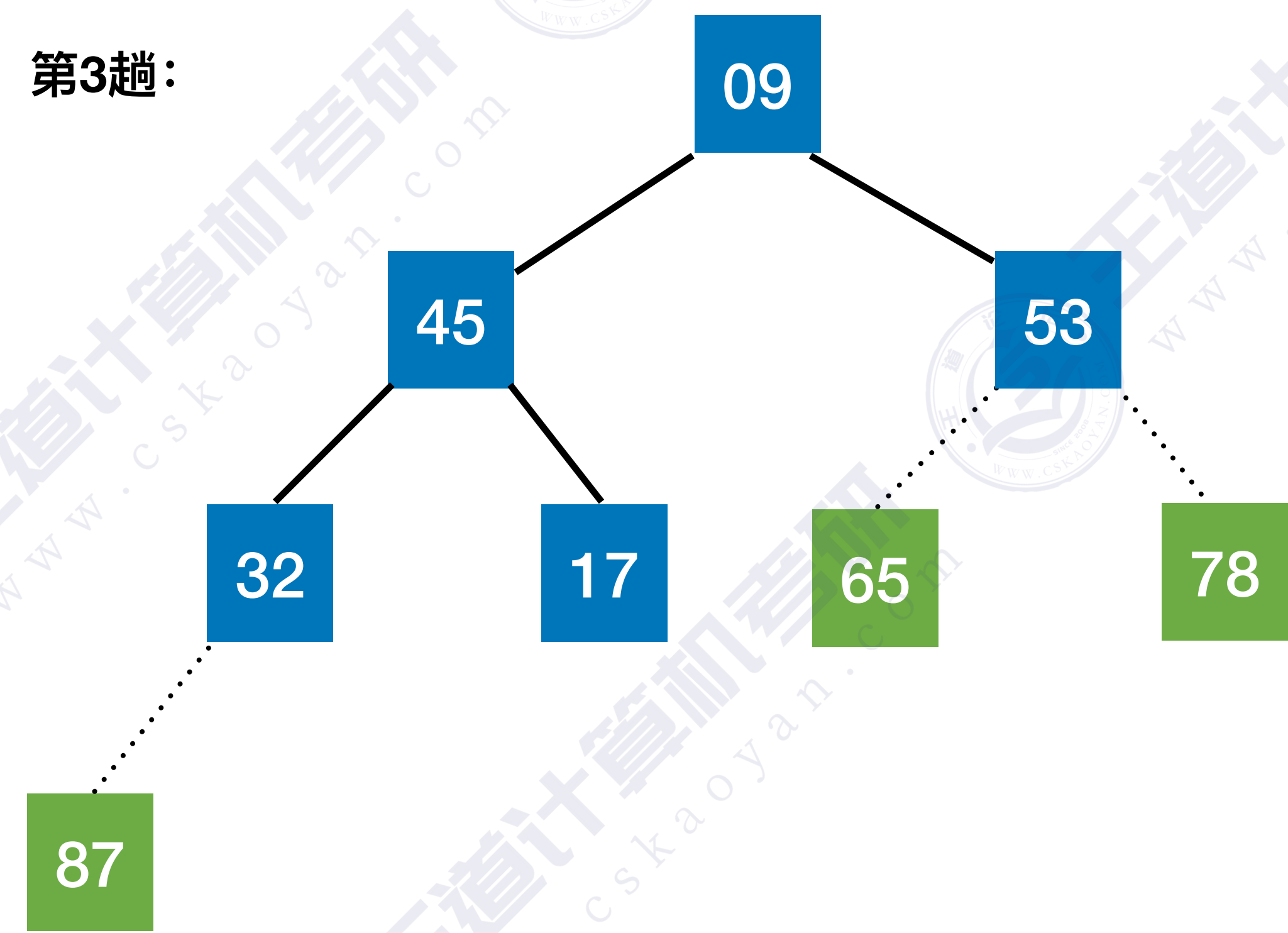
并将待排序元素序列再次调整为大根堆
(小元素不断“下坠”)

基于大根堆进行排序

大根堆



第3趟:



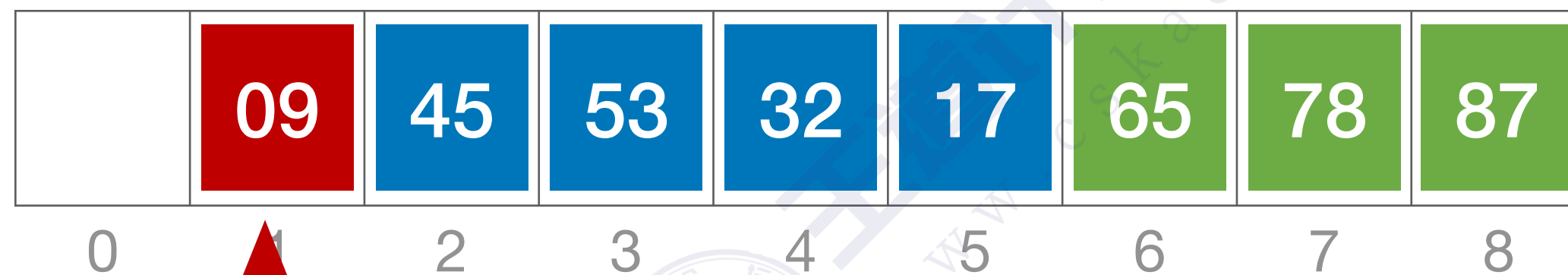
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

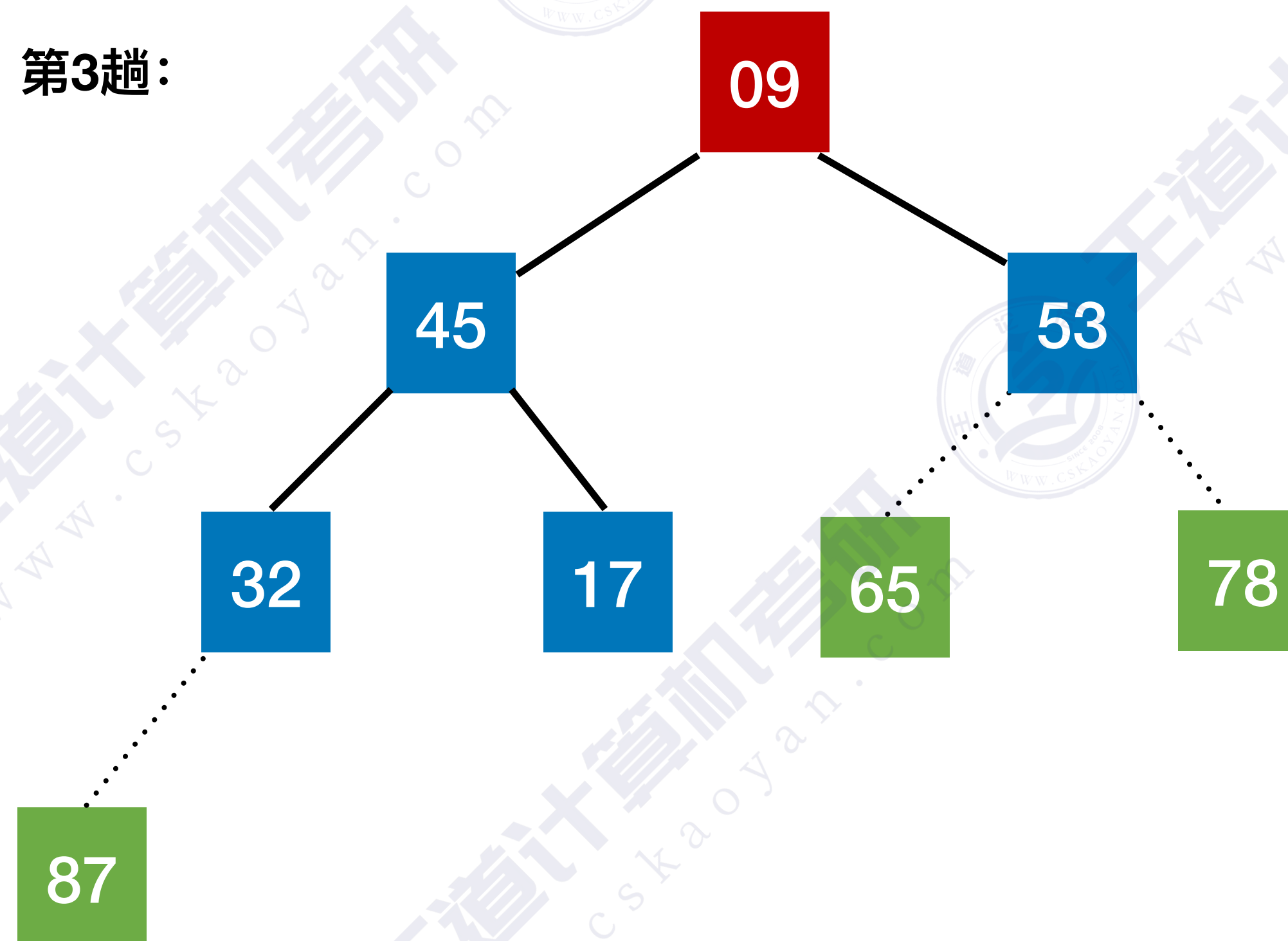
并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

基于大根堆进行排序

大根堆



第3趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

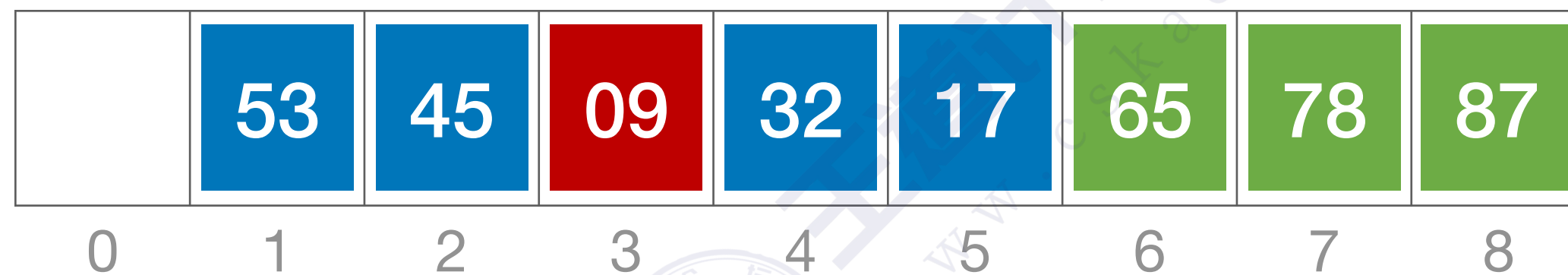
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

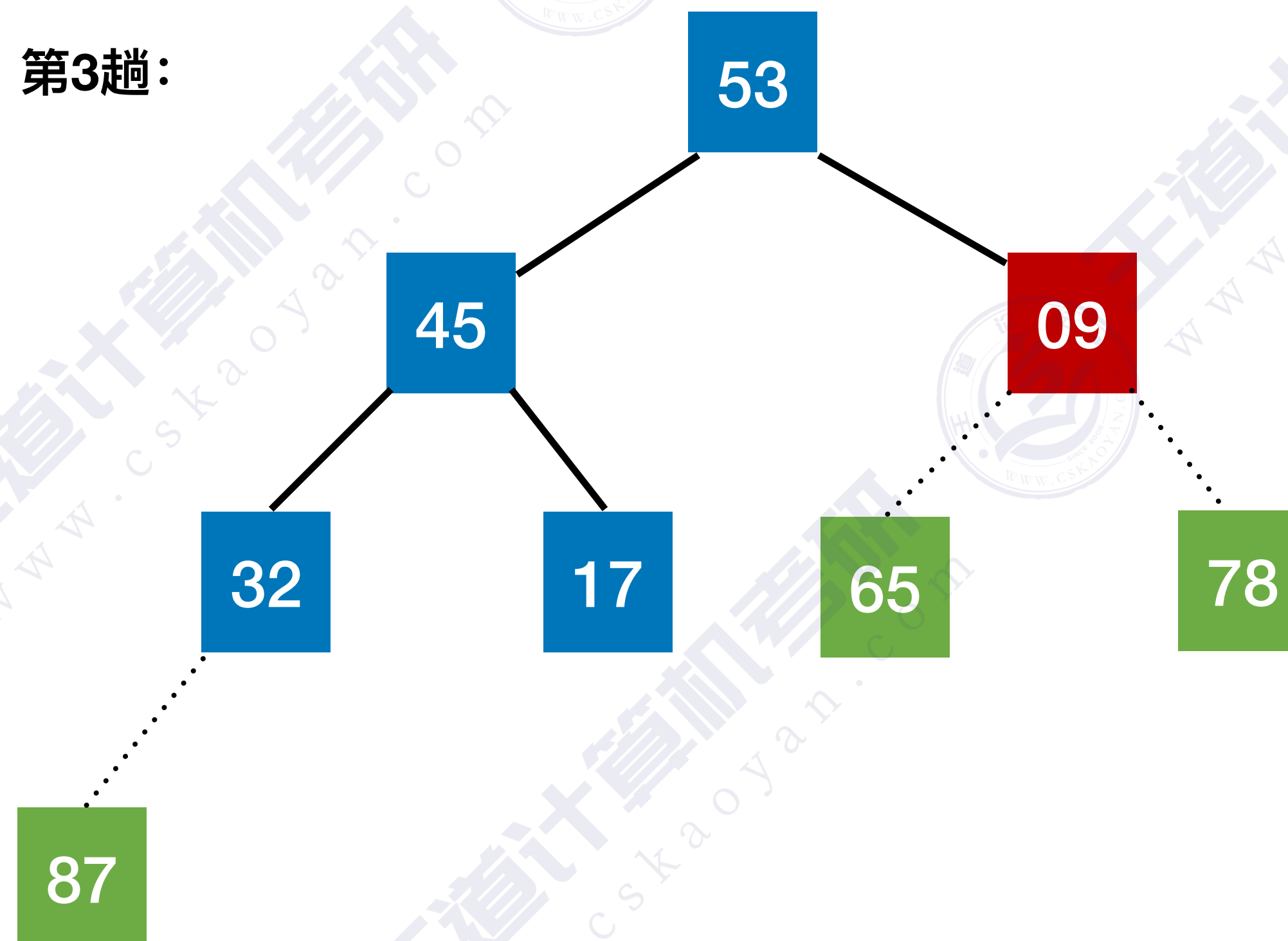
len=5

基于大根堆进行排序

大根堆



第3趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

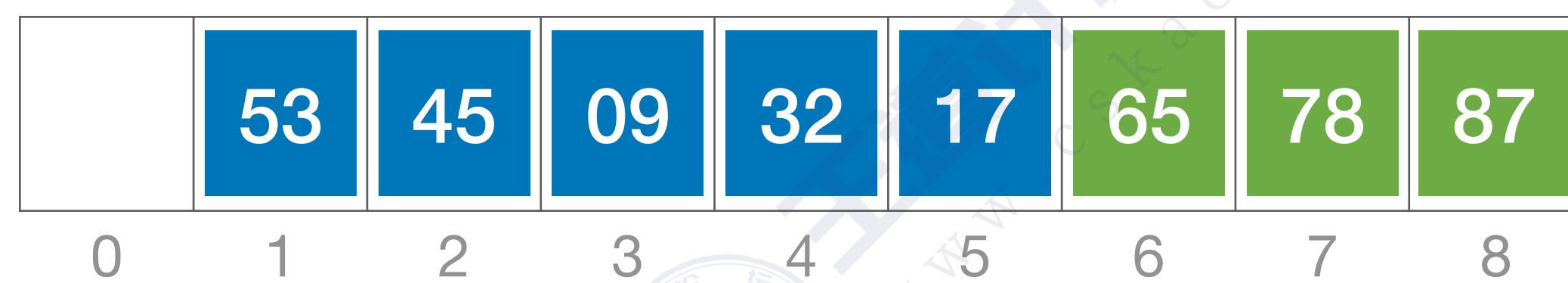
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

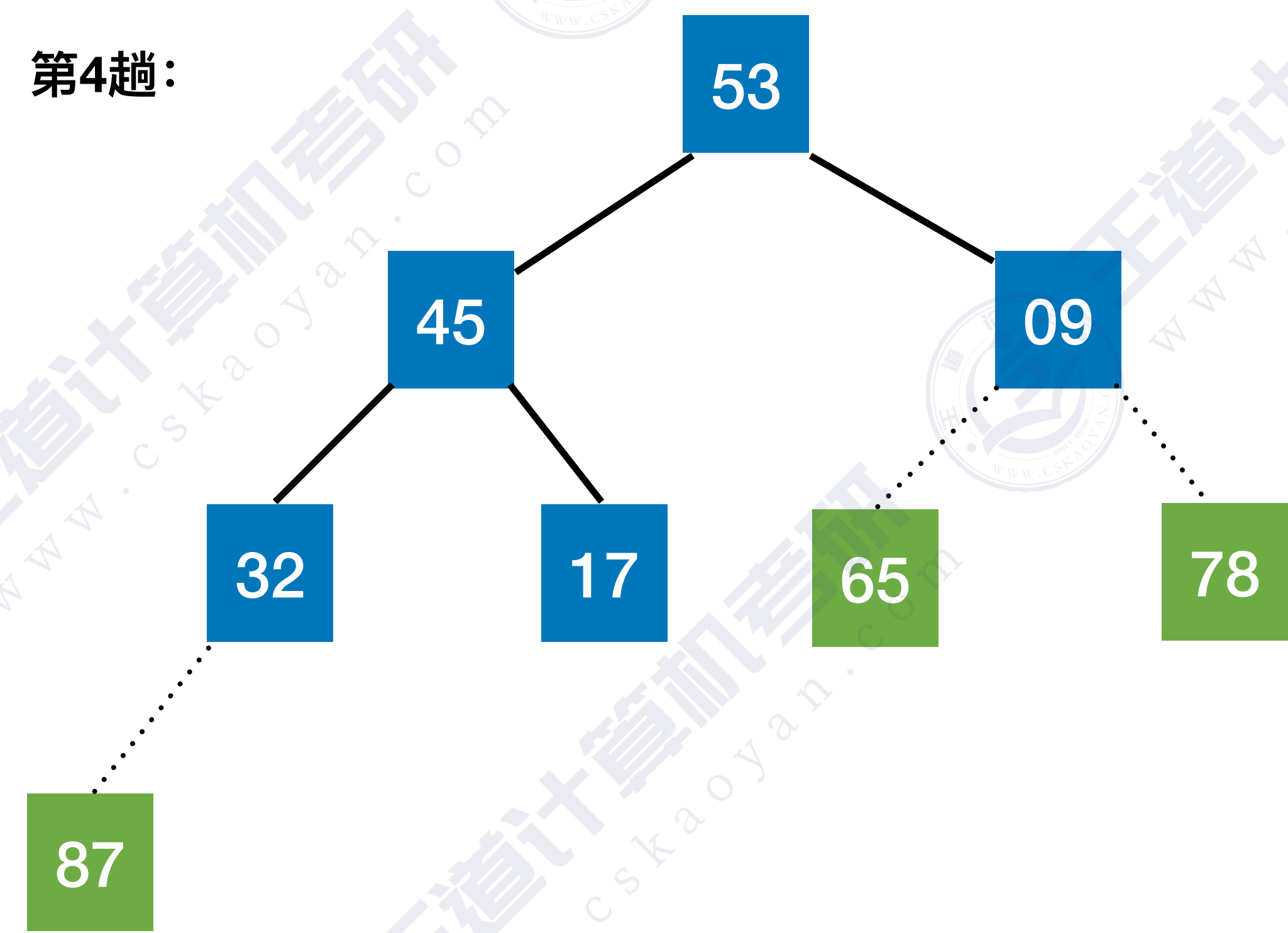
len=5

基于大根堆进行排序

大根堆



第4趟:



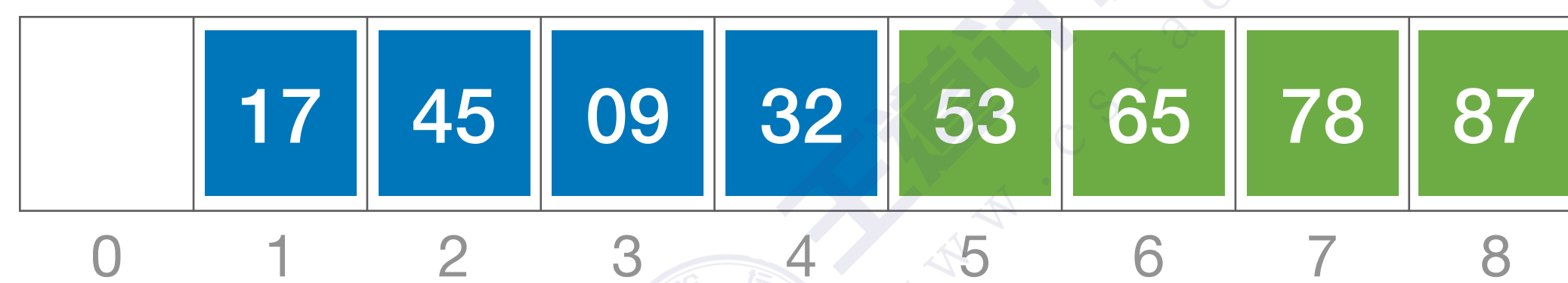
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

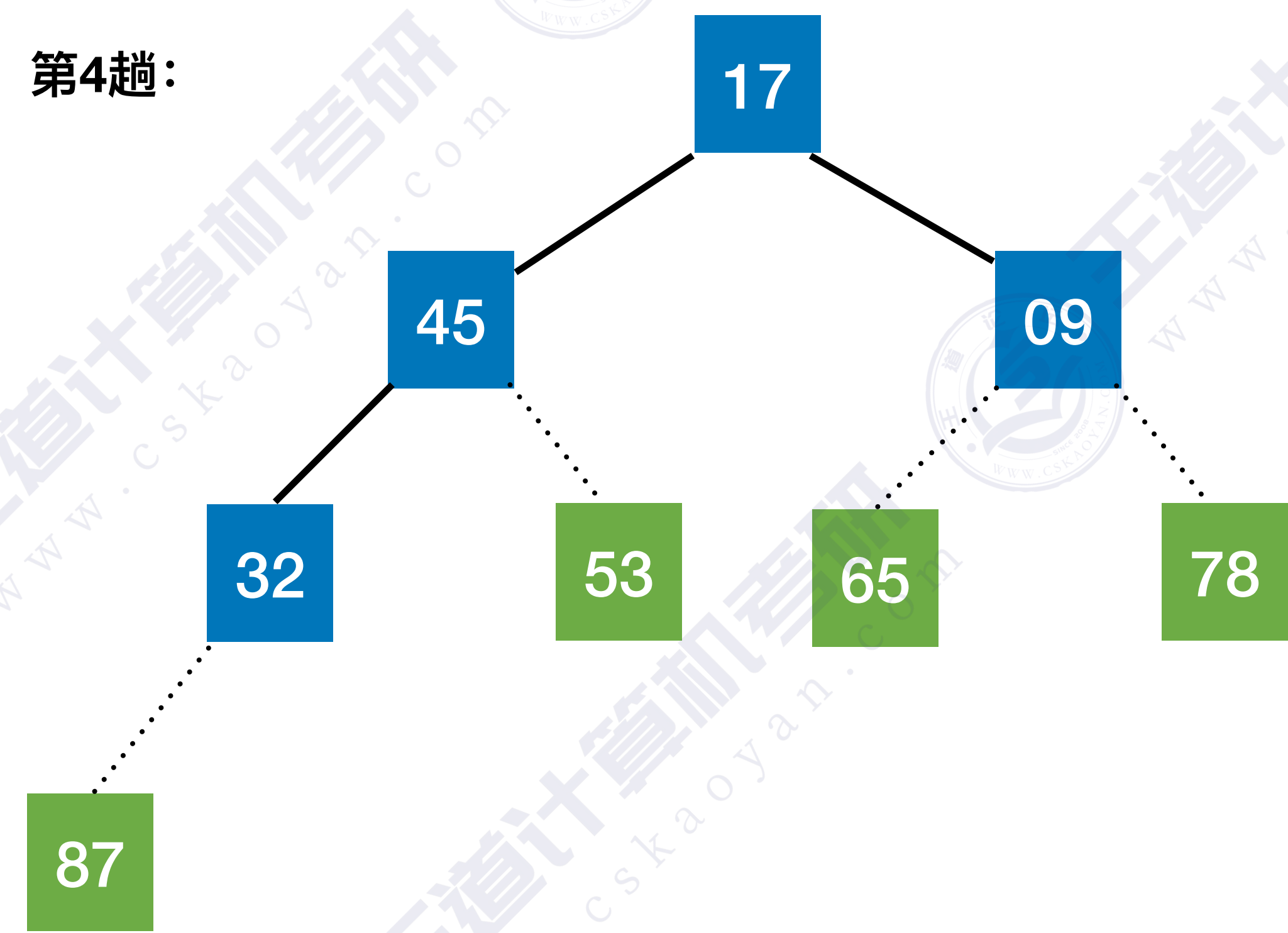
并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

基于大根堆进行排序

大根堆



第4趟:



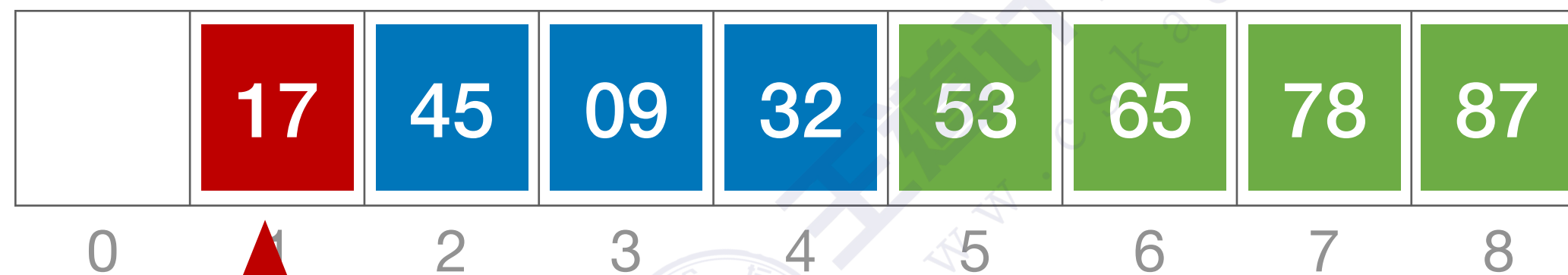
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列
(与待排序序列中的最后一个元素交换)

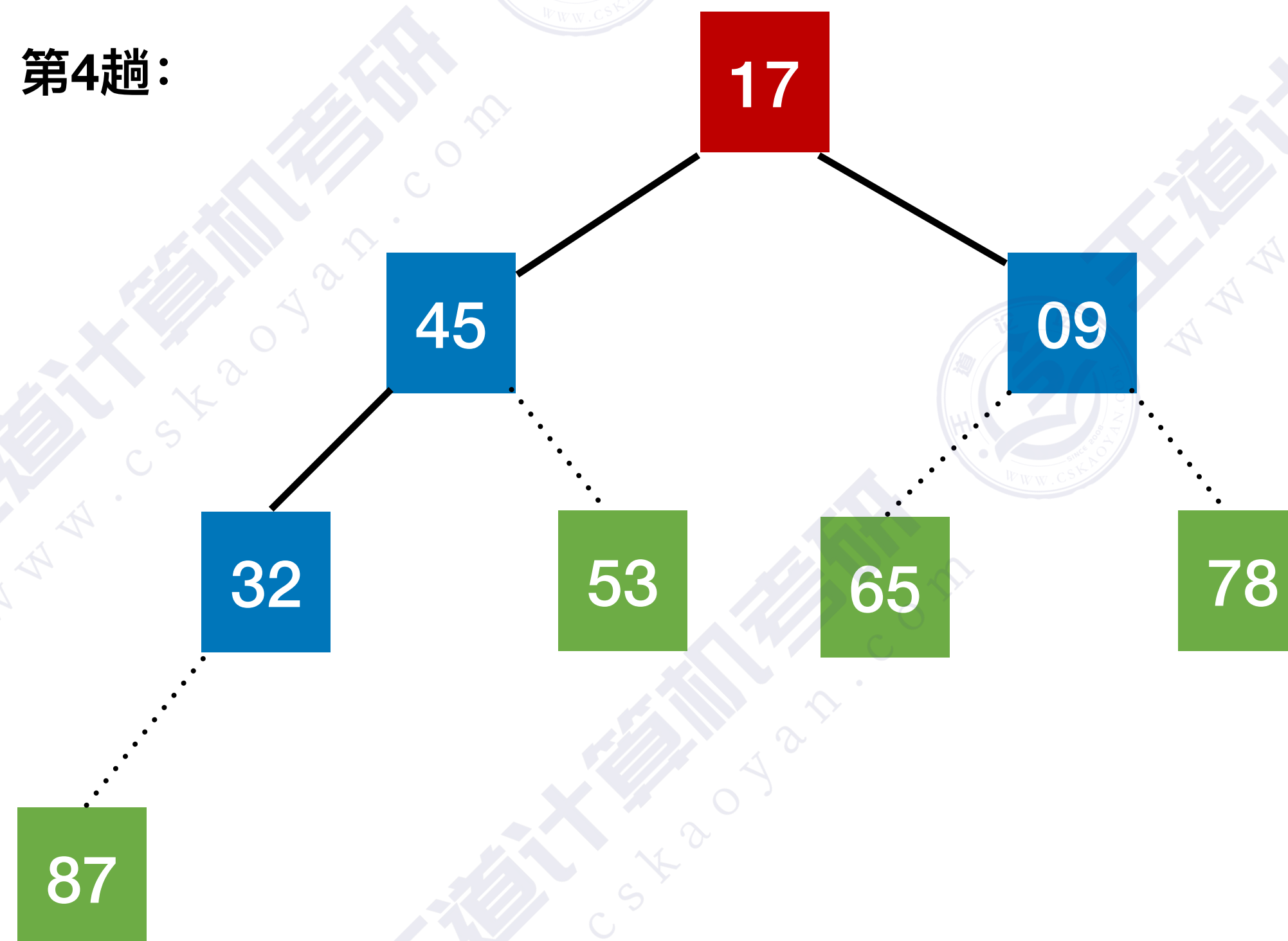
并将待排序元素序列再次调整为大根堆
(小元素不断“下坠”)

基于大根堆进行排序

大根堆



第4趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

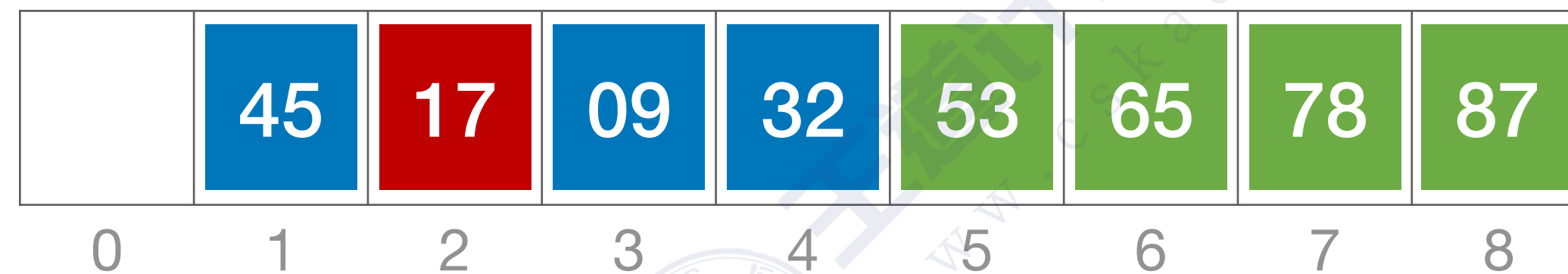
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

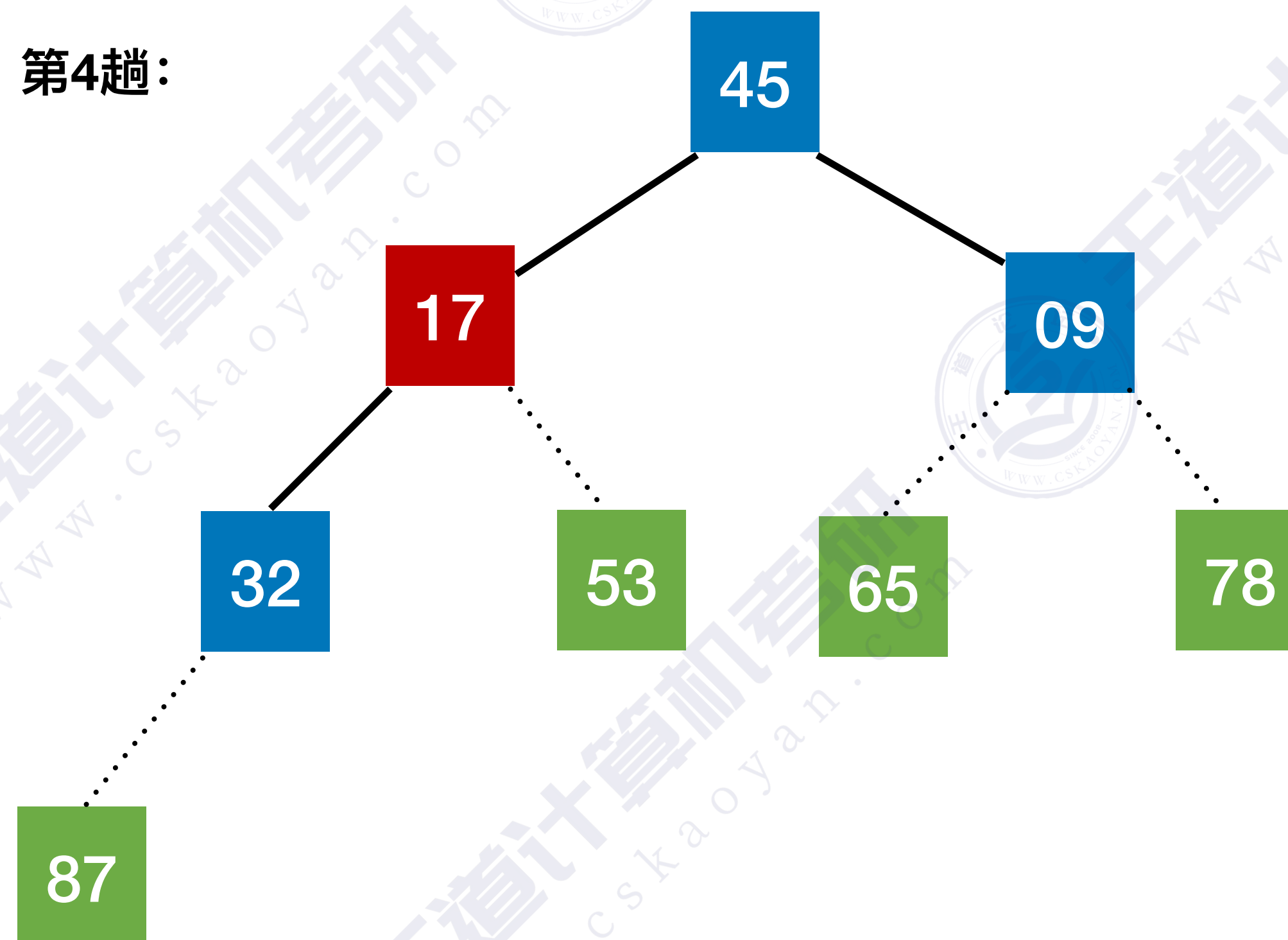
len=4

基于大根堆进行排序

大根堆



第4趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

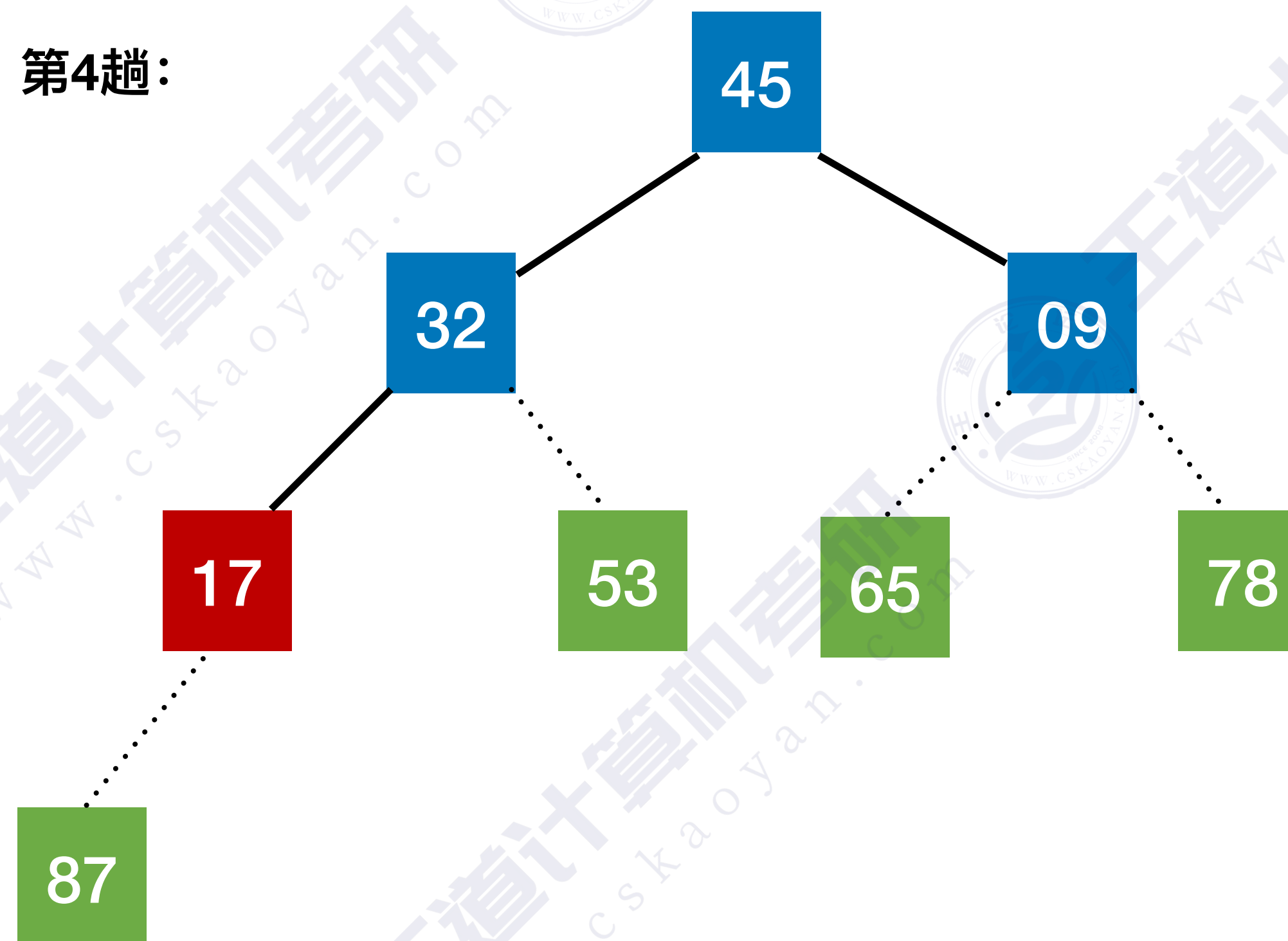
len=4

基于大根堆进行排序

大根堆



第4趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

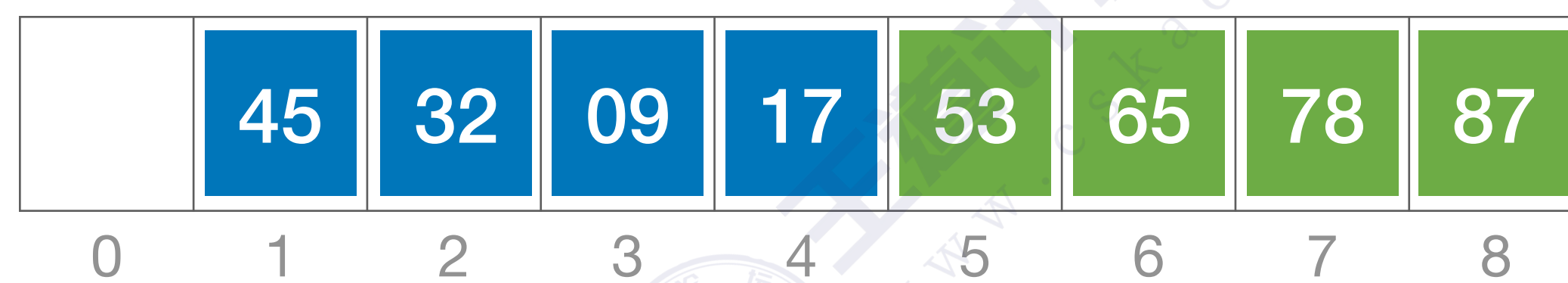
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

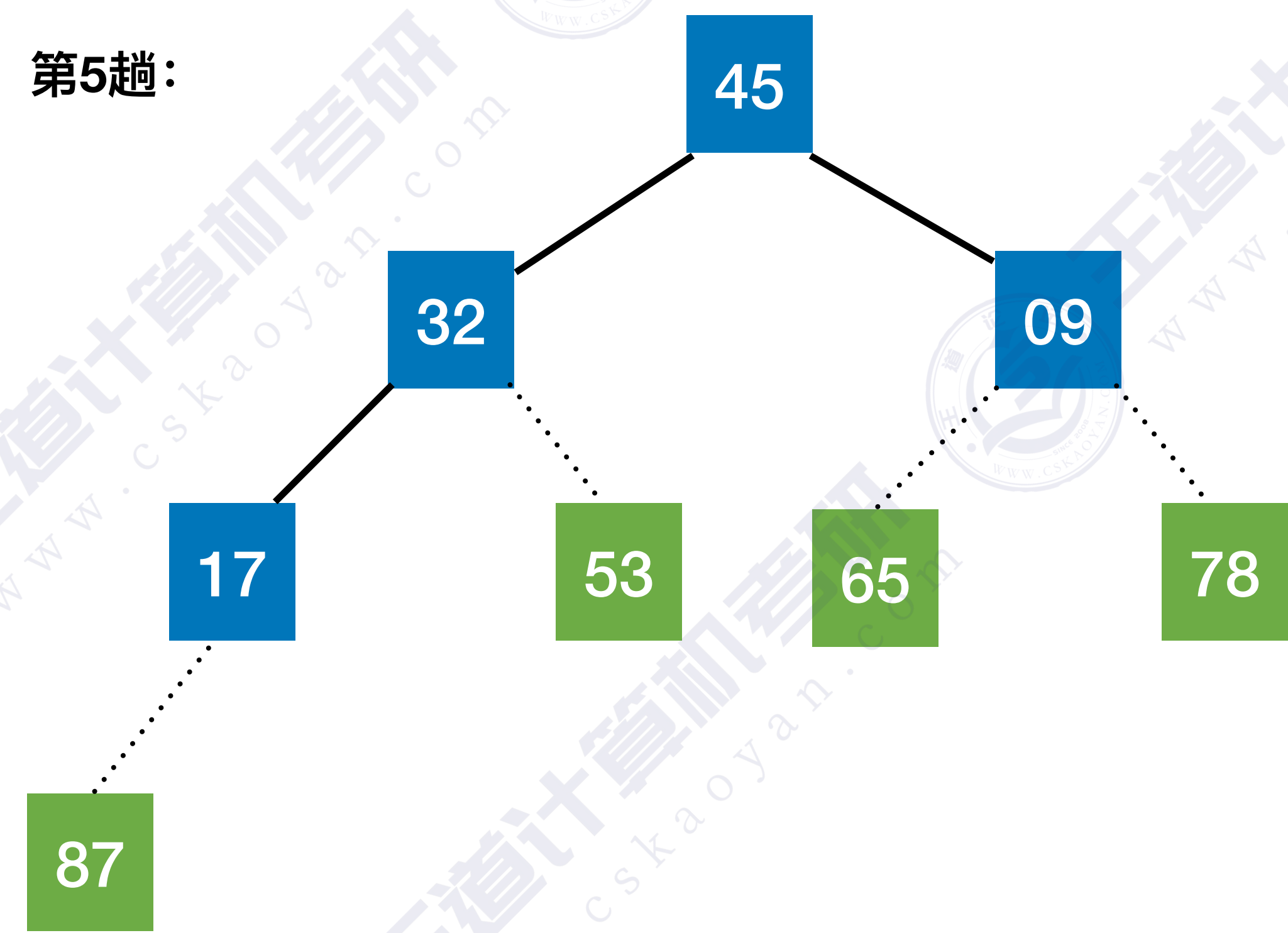
len=4

基于大根堆进行排序

大根堆



第5趟:



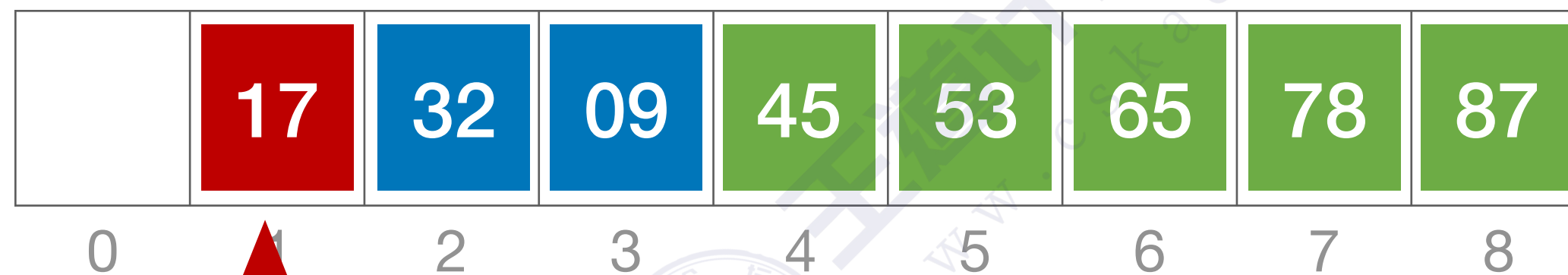
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

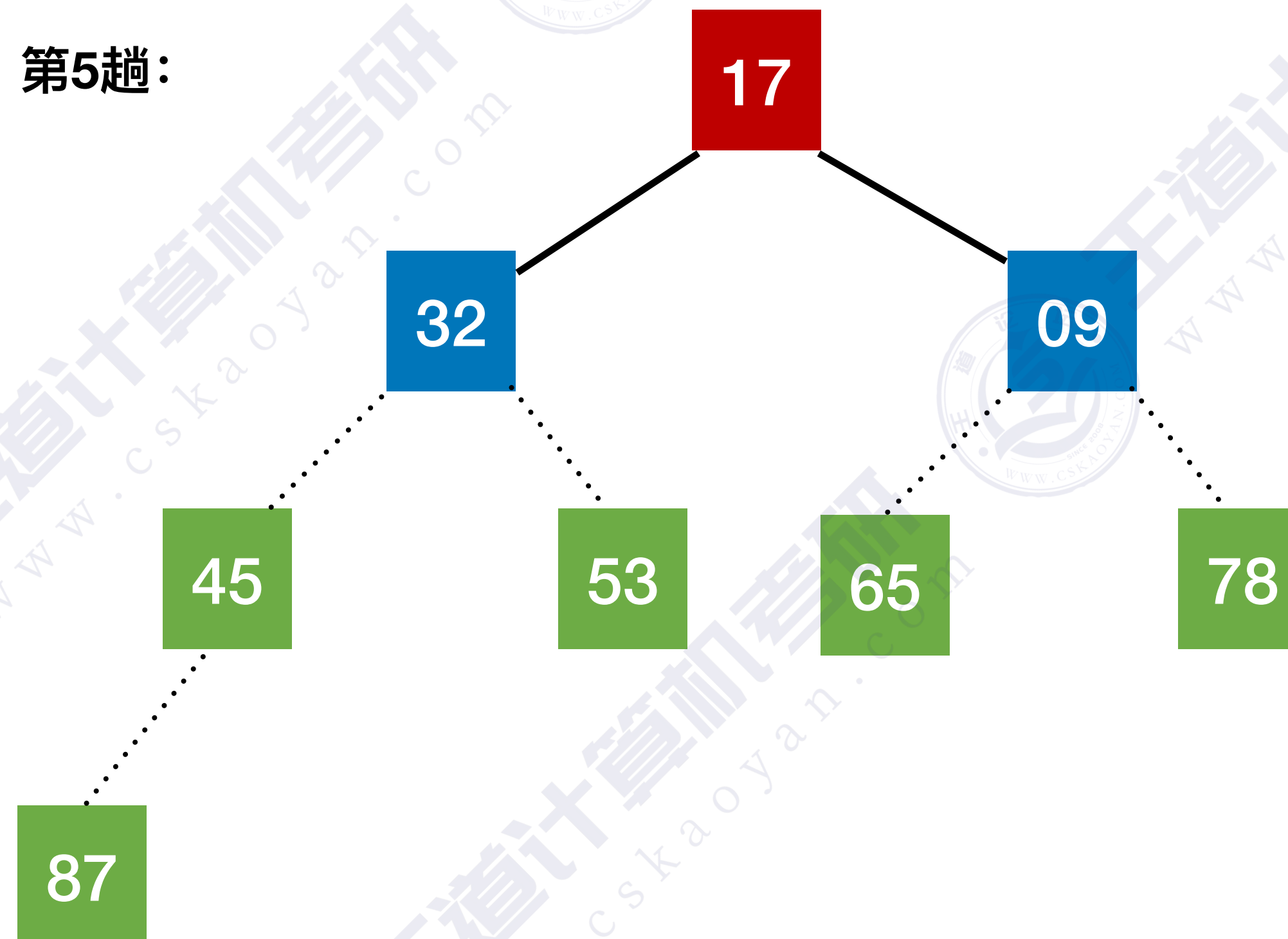
并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

基于大根堆进行排序

大根堆



第5趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

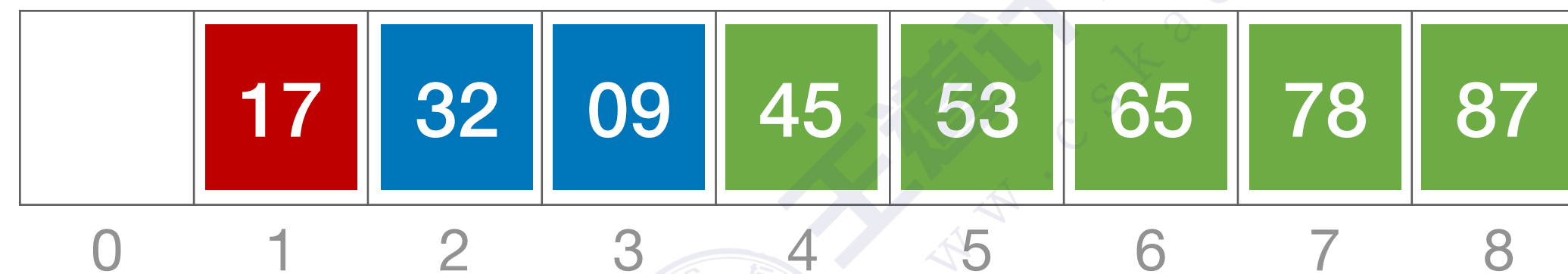
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

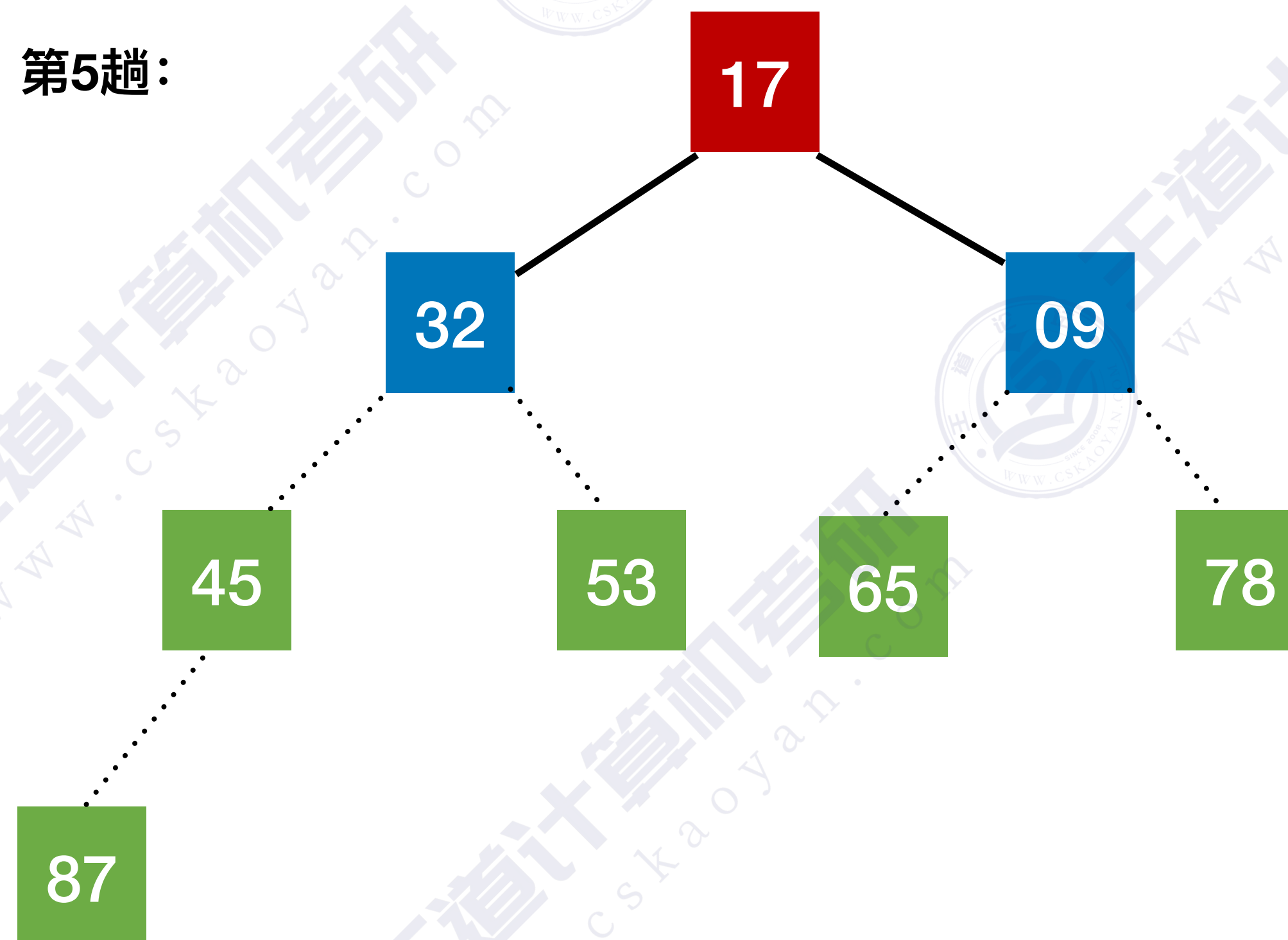
len=3

基于大根堆进行排序

大根堆



第5趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

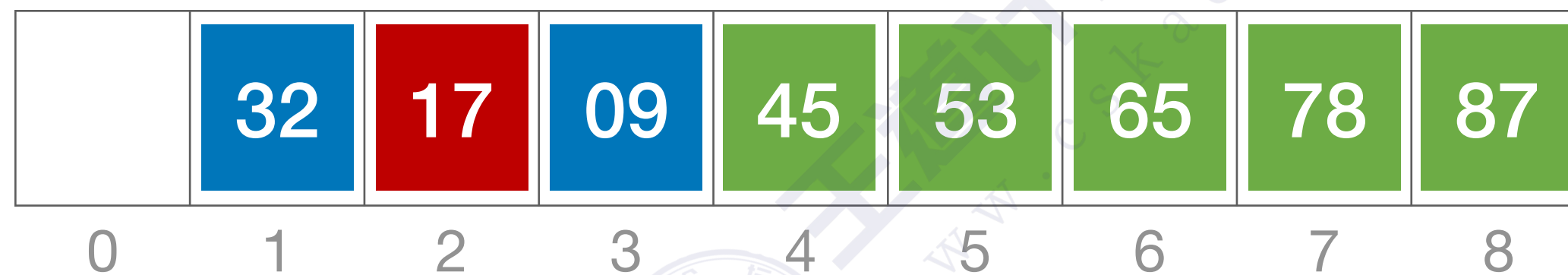
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

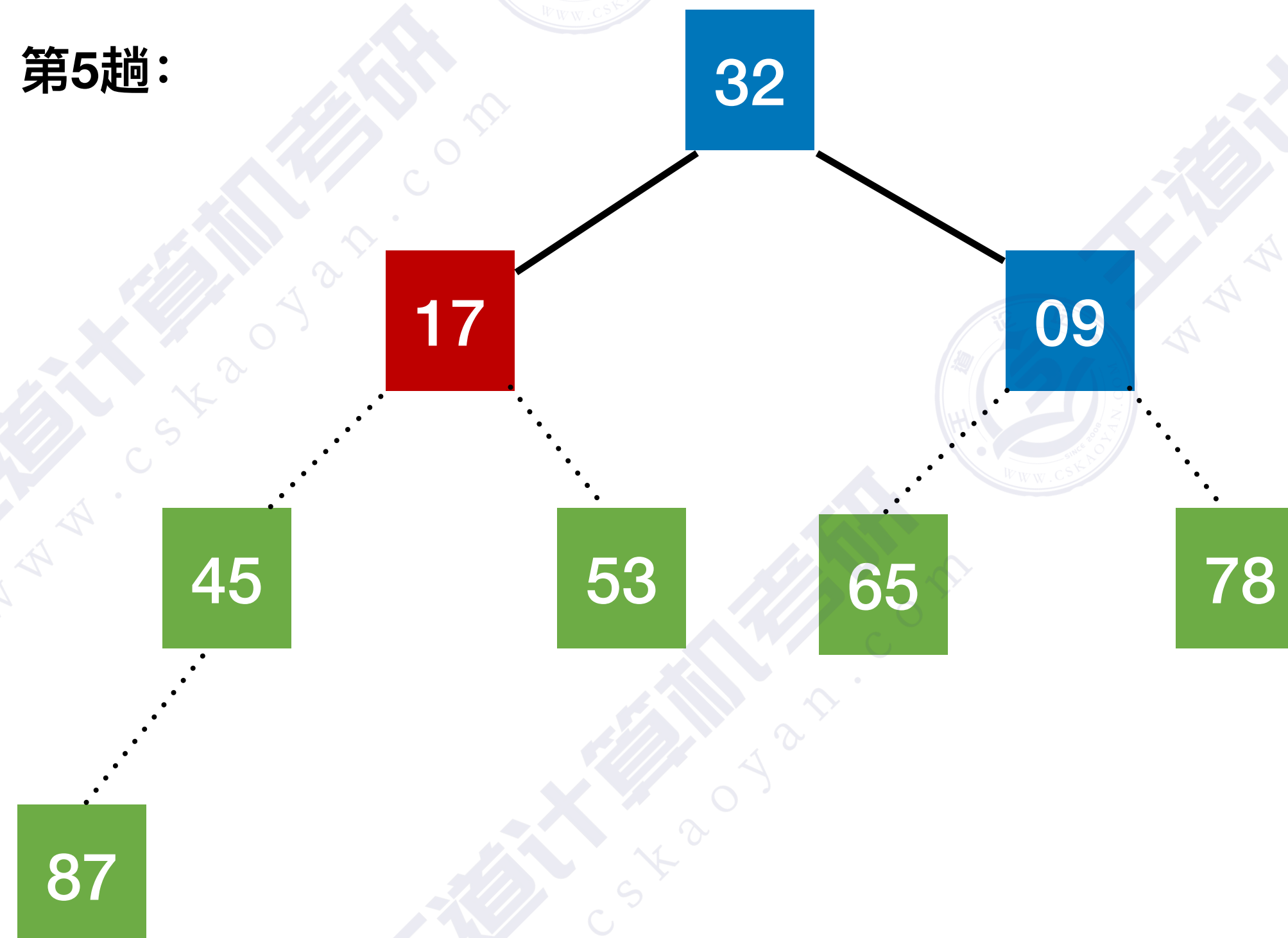
len=3

基于大根堆进行排序

大根堆



第5趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

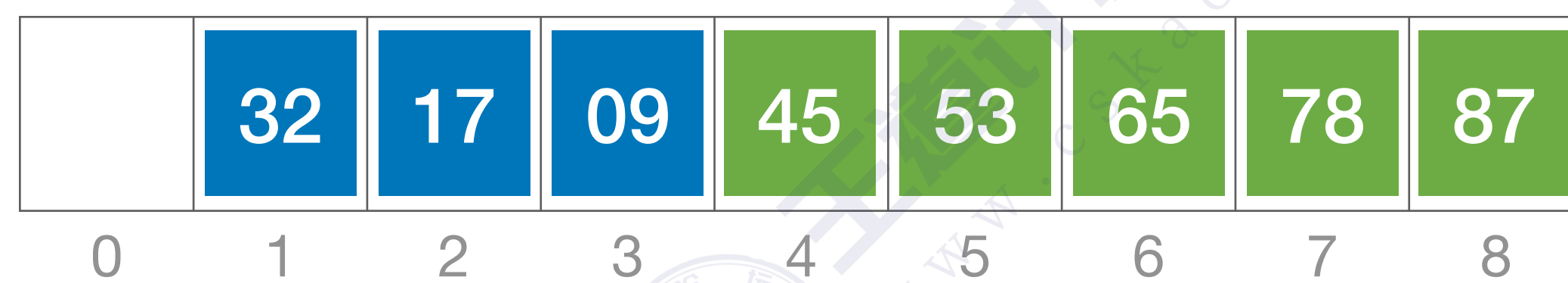
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

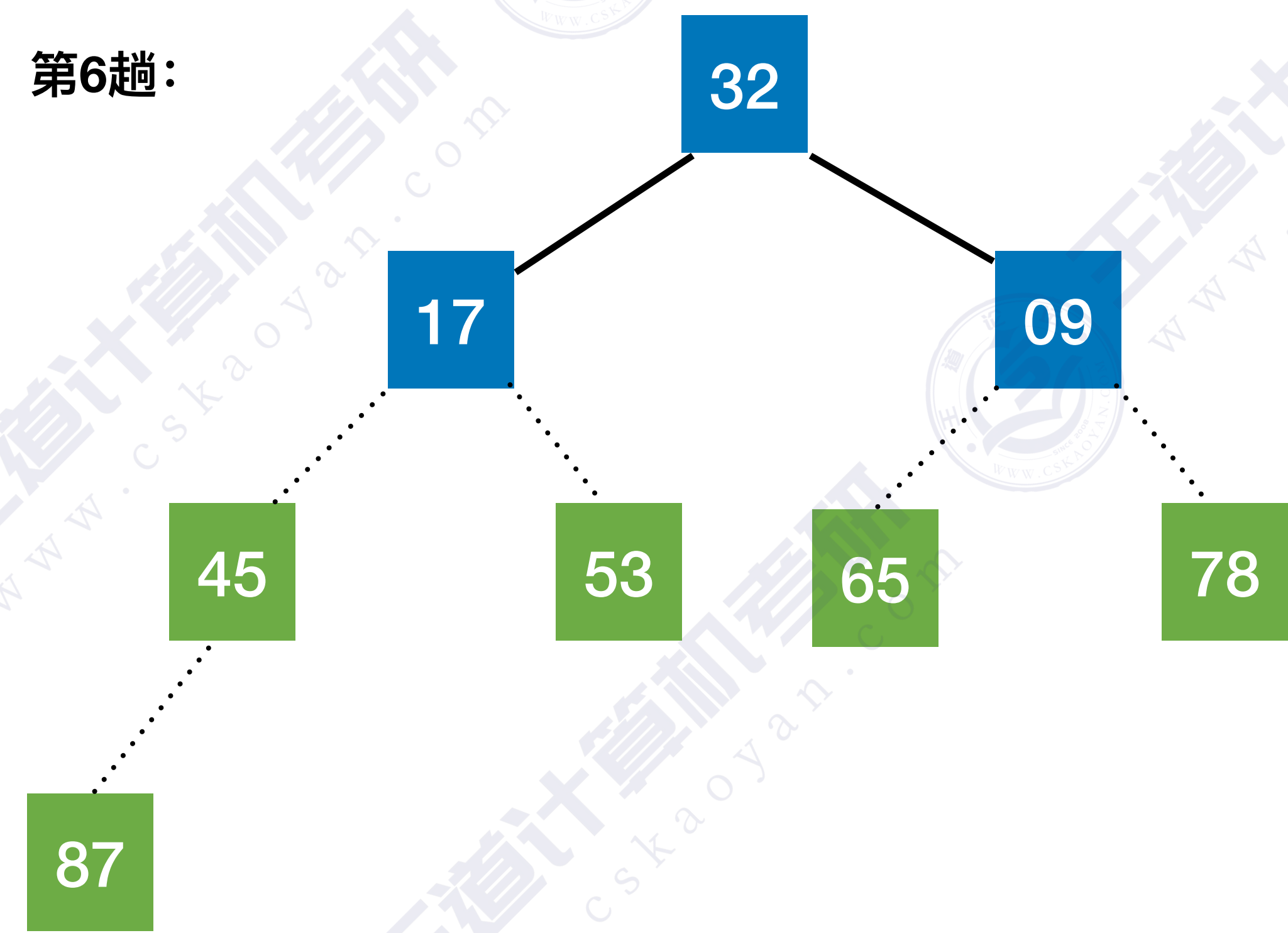
len=3

基于大根堆进行排序

大根堆



第6趟:



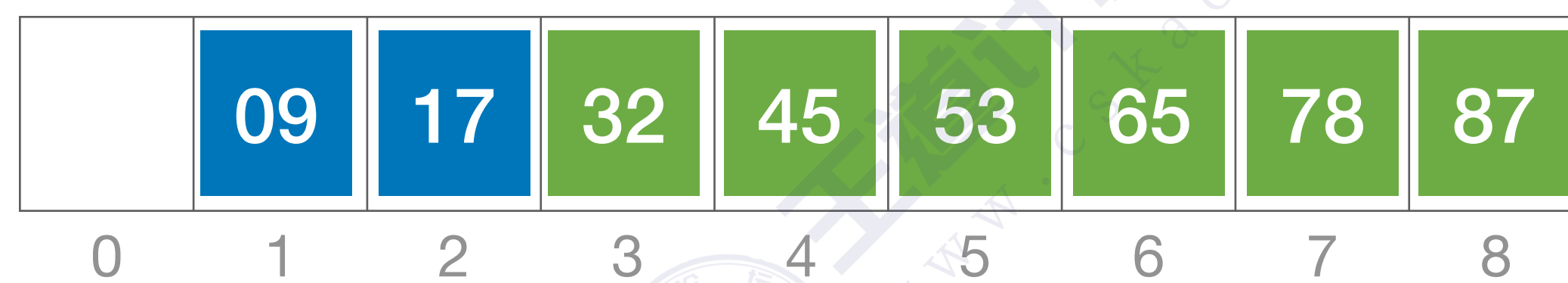
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列
(与待排序序列中的最后一个元素交换)

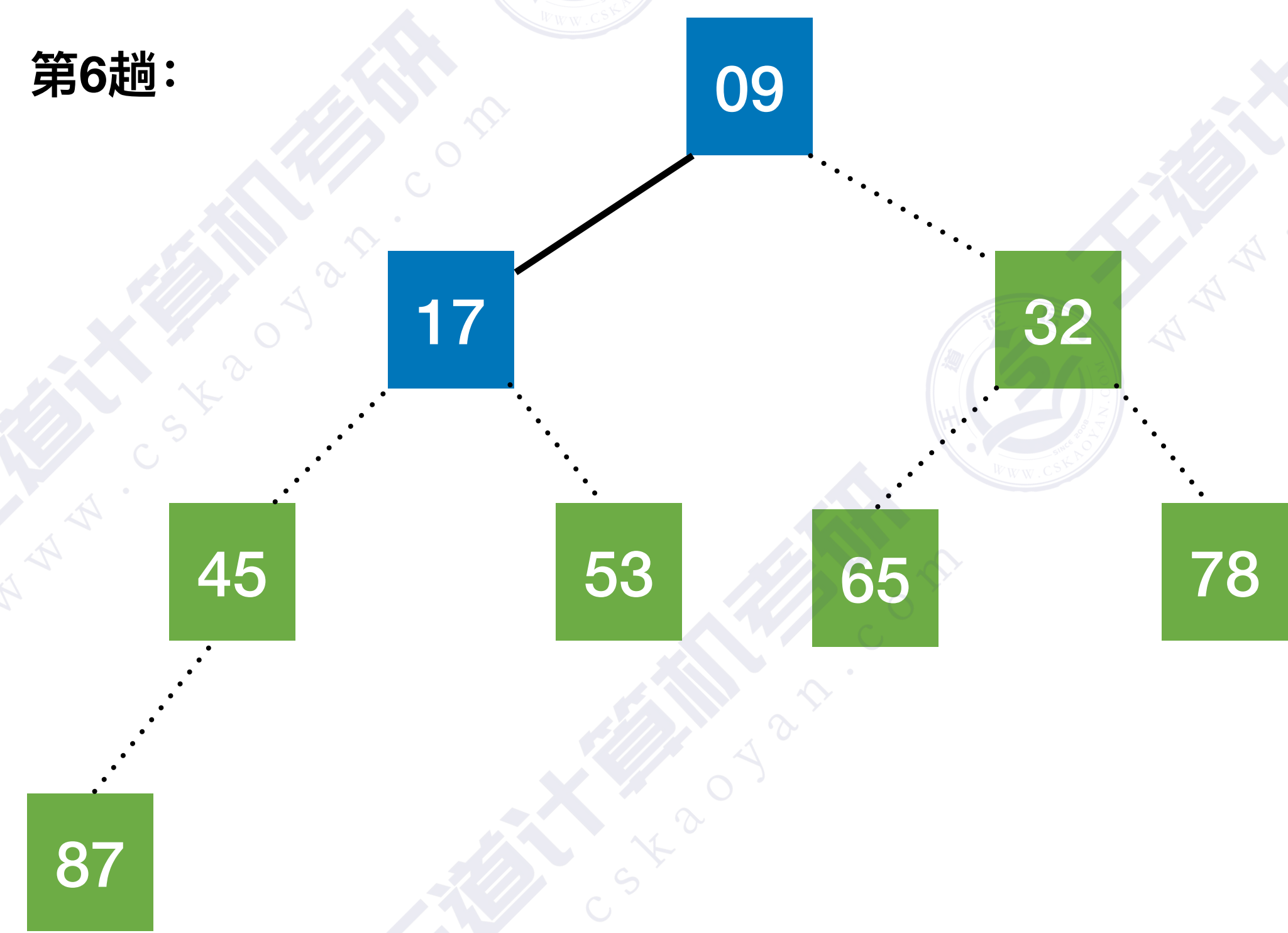
并将待排序元素序列再次调整为大根堆
(小元素不断“下坠”)

基于大根堆进行排序

大根堆



第6趟:



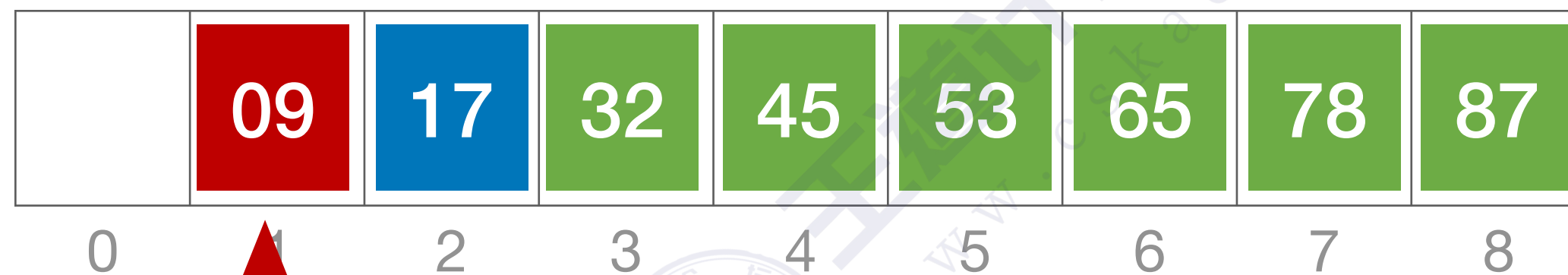
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列
(与待排序序列中的最后一个元素交换)

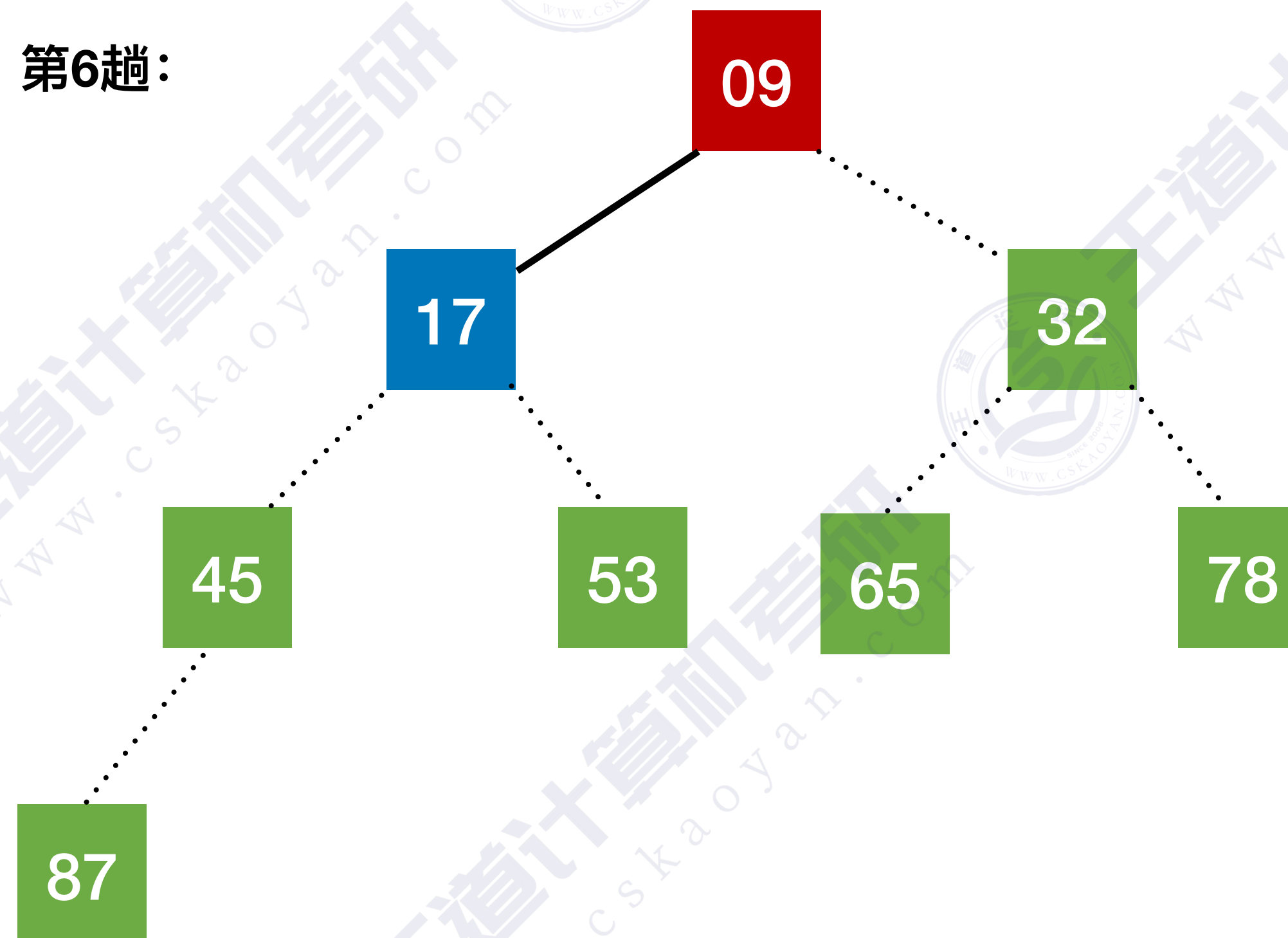
并将待排序元素序列再次调整为大根堆
(小元素不断“下坠”)

基于大根堆进行排序

大根堆



第6趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

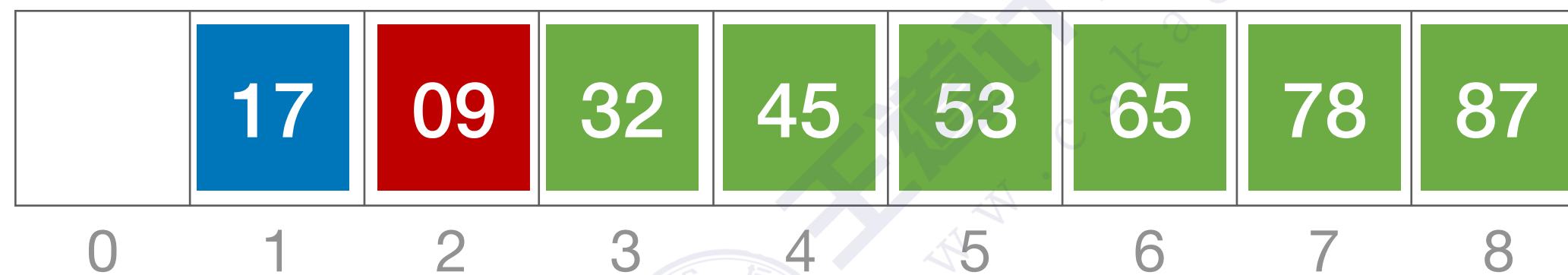
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

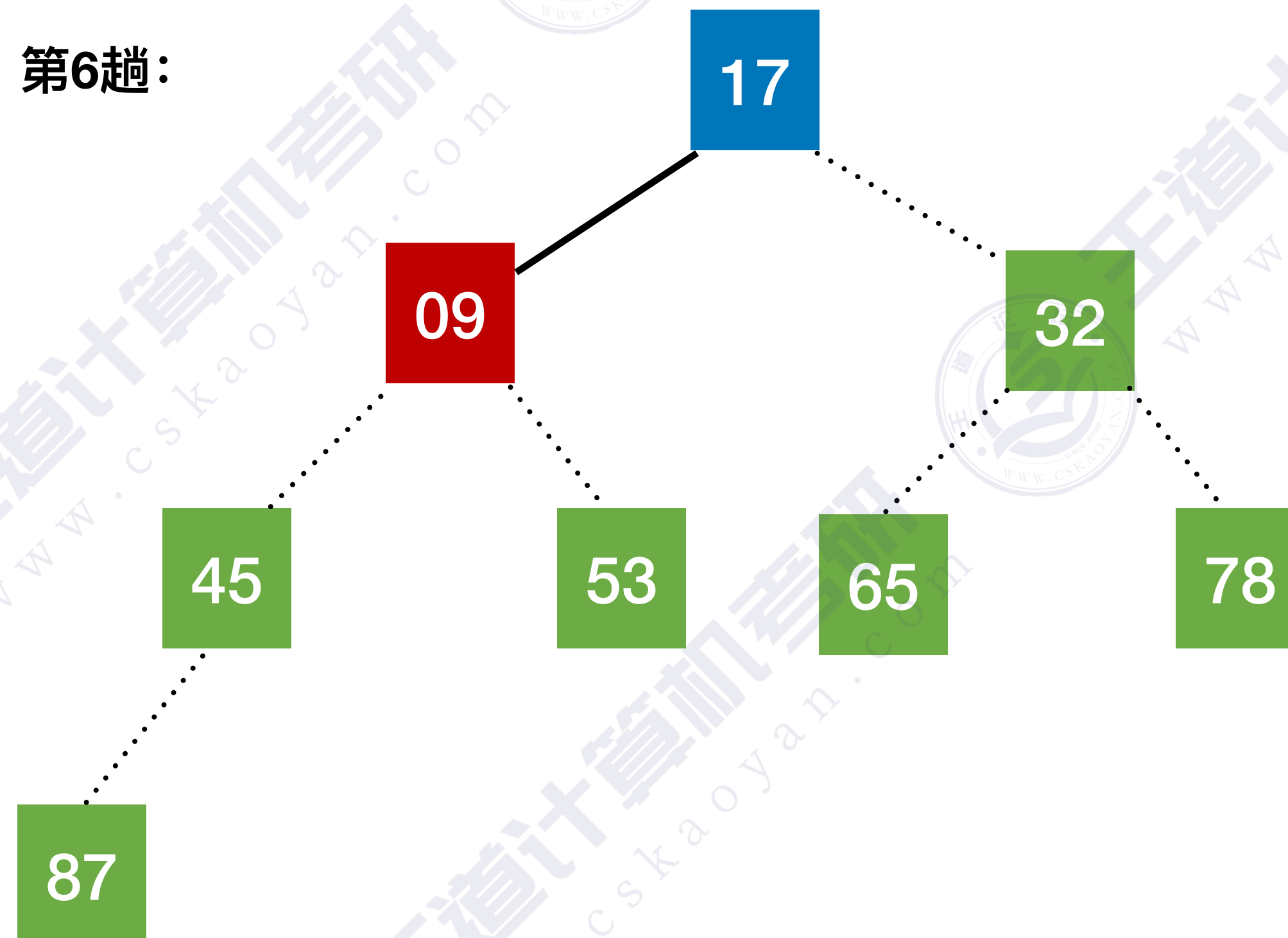
len=2

基于大根堆进行排序

大根堆



第6趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

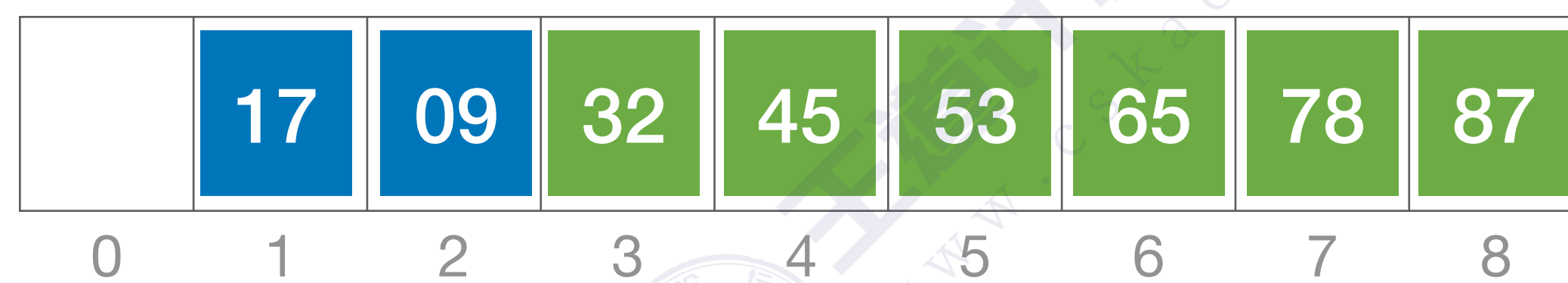
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

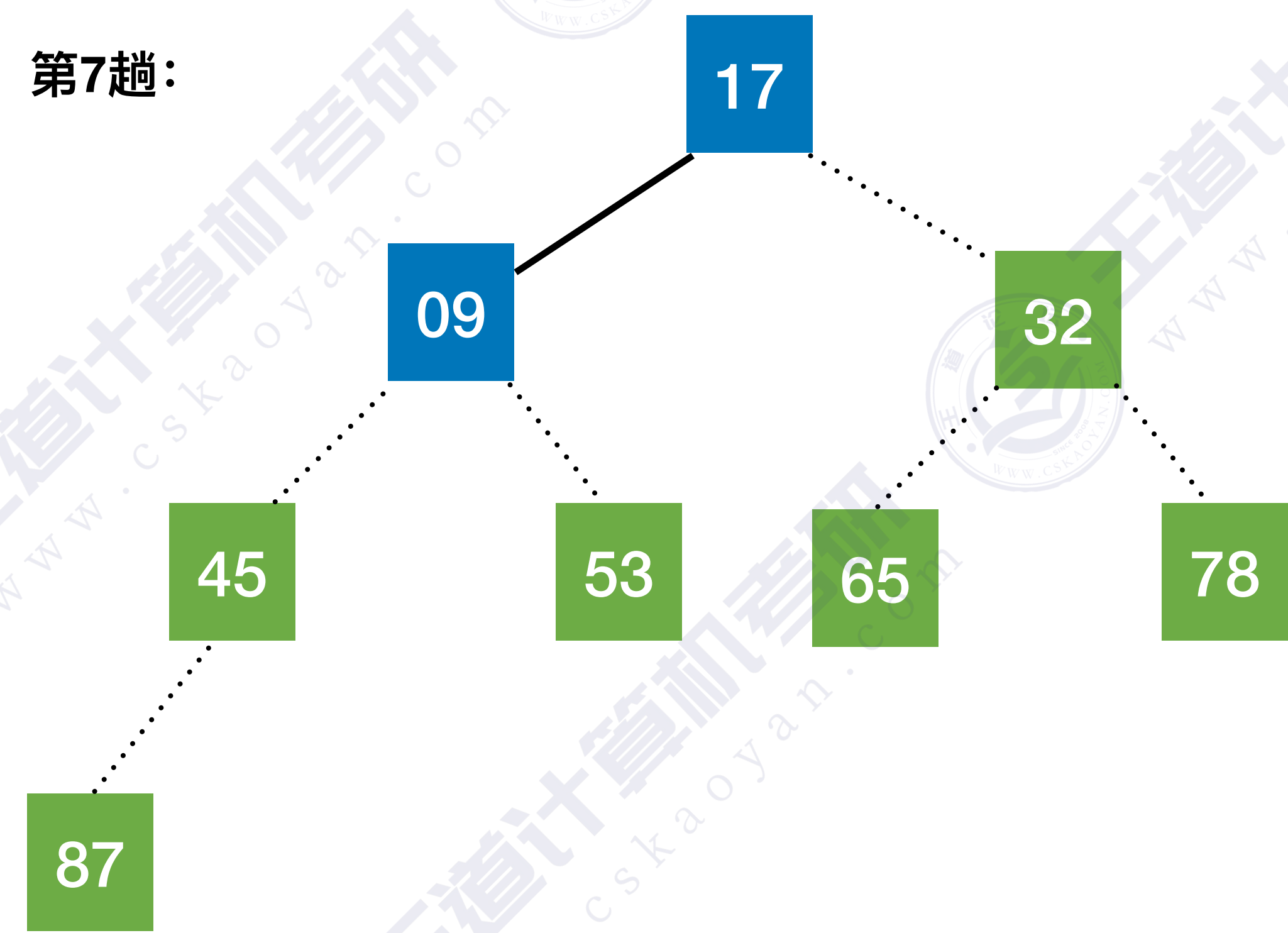
len=2

基于大根堆进行排序

大根堆



第7趟:



选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

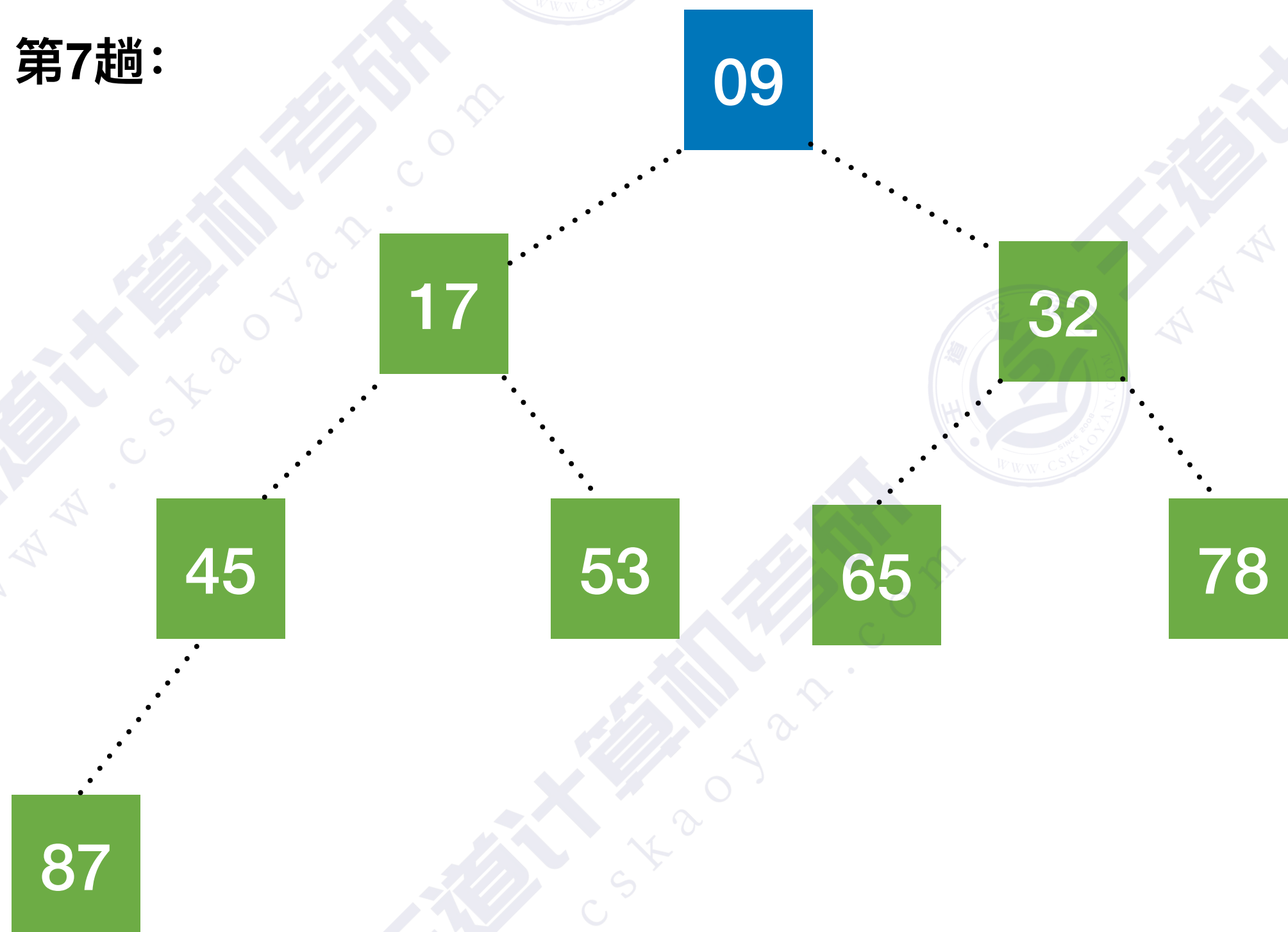
基于大根堆进行排序

大根堆

只剩下最后一个待排序元素，不用再调整



第7趟:



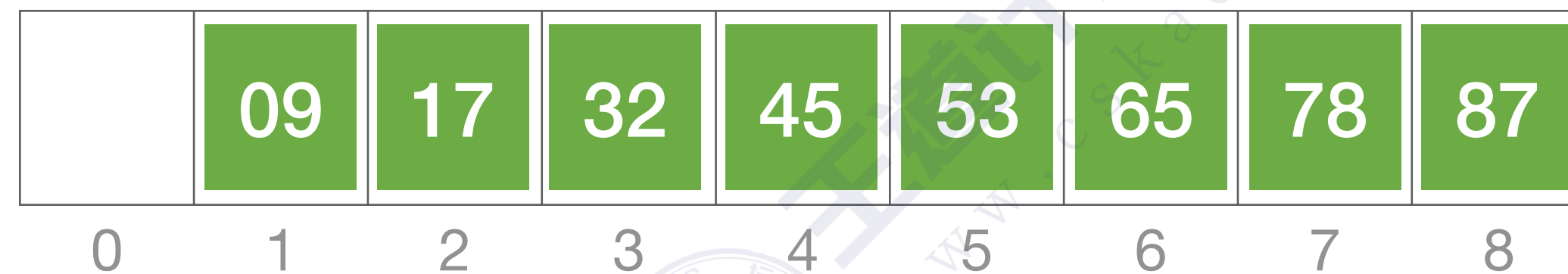
选择排序：每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆（小元素不断“下坠”）

基于大根堆进行排序

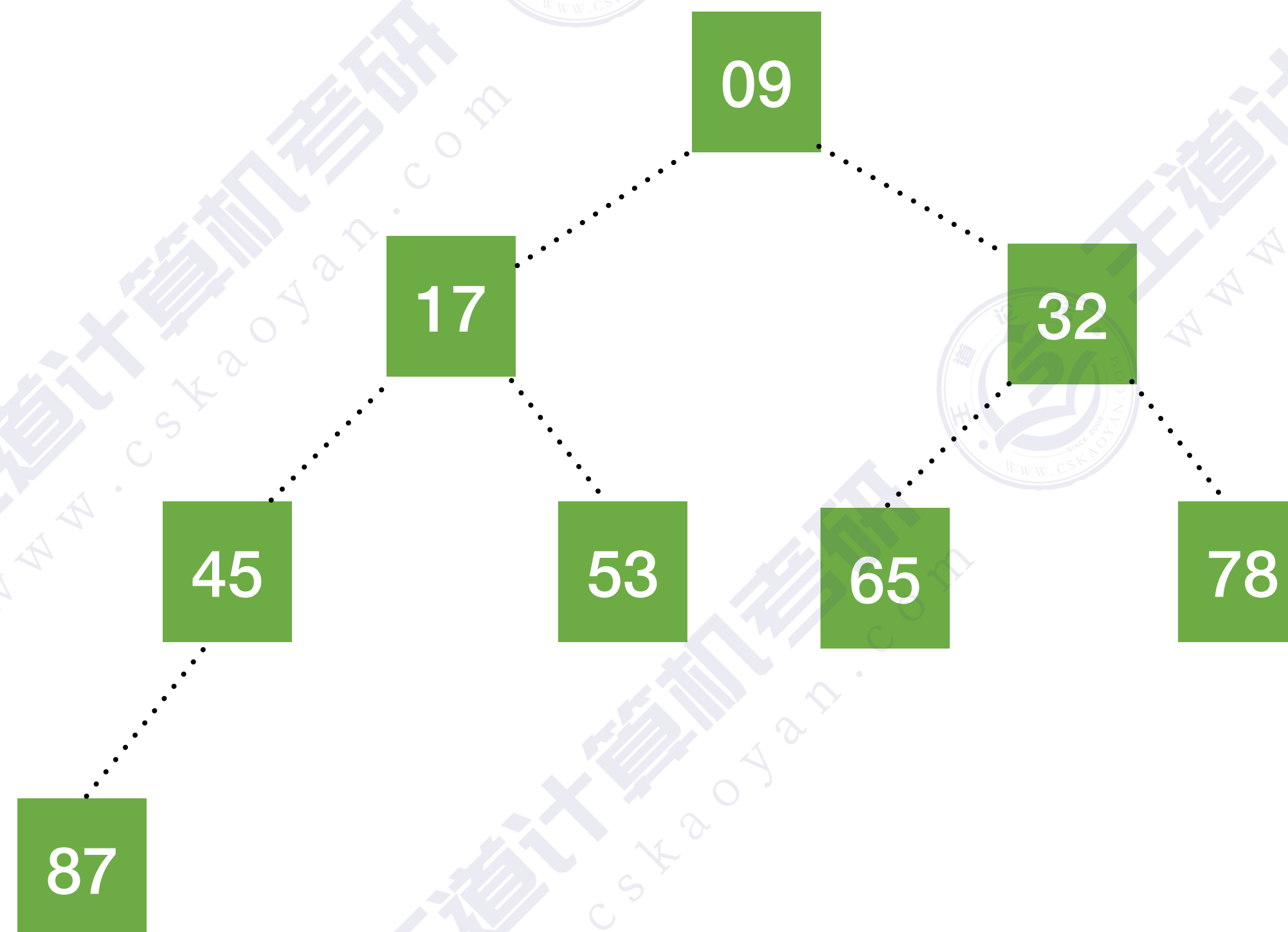
$n-1$ 趟 处理之后:



选择排序: 每一趟在待排序元素中选取关键字最大的元素加入有序子序列

堆排序: 每一趟将堆顶元素加入有序子序列 (与待排序序列中的最后一个元素交换)

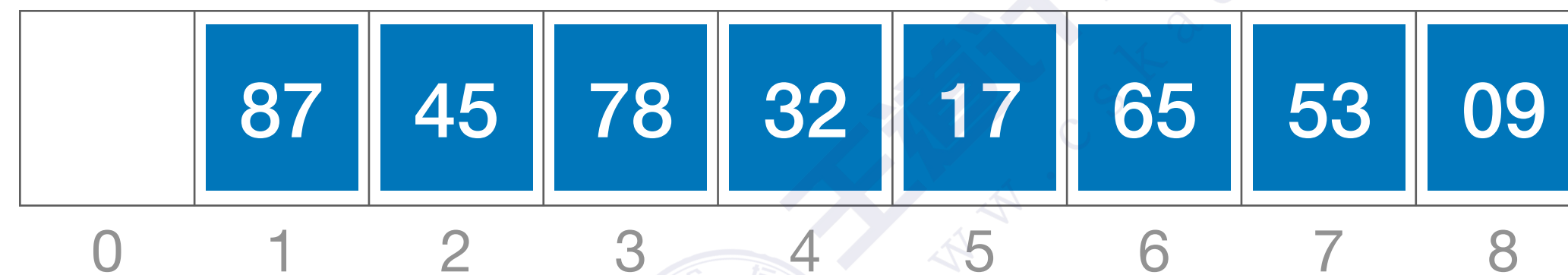
并将待排序元素序列再次调整为大根堆 (小元素不断“下坠”)



注意: 基于“大根堆”的堆排序得到“递增序列”

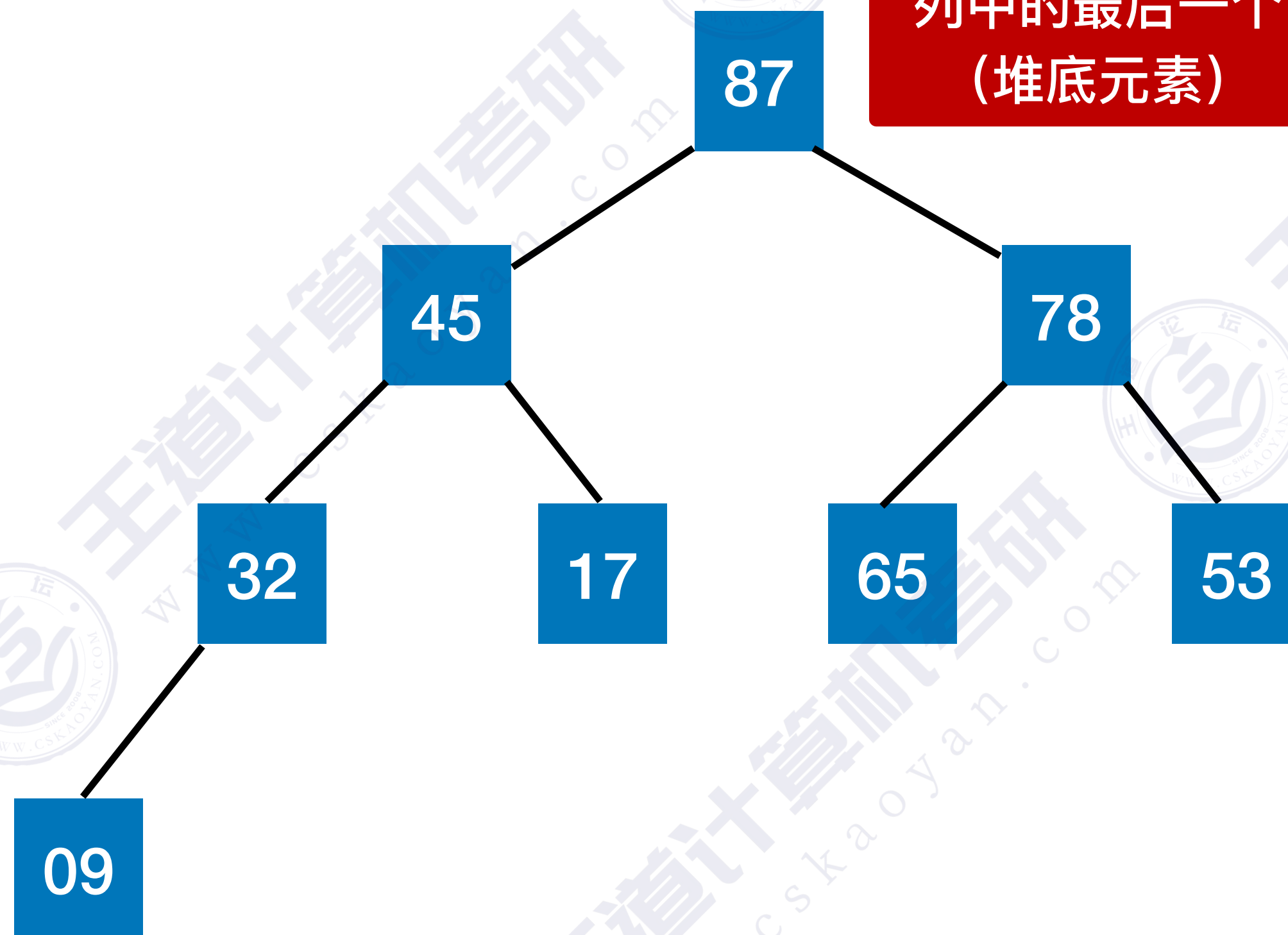
基于大根堆进行排序（代码）

大根堆



指向待排序元素序列中的最后一个（堆底元素）

i



//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len)
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len)
```

//堆排序的完整逻辑

```
void HeapSort(int A[],int len){
```

```
    BuildMaxHeap(A,len);
```

//初始建堆

```
    for(int i=len;i>1;i--){
```

//n-1趟的交换和建堆过程

```
        swap(A[i],A[1]);
```

//堆顶元素和堆底元素交换

```
        HeadAdjust(A,1,i-1);
```

//把剩余的待排序元素整理成堆

```
    }
```

```
}
```

堆排序：每一趟将堆顶元素加入有序子序列
（与待排序序列中的最后一个元素交换）

并将待排序元素序列再次调整为大根堆
（小元素不断“下坠”）

算法效率分析

//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//堆排序的完整逻辑

```
void HeapSort(int A[],int len){  
    BuildMaxHeap(A,len); //初始建堆  
    for(int i=len;i>1;i--){ //n-1趟的交换和建堆过程  
        swap(A[i],A[1]); //堆顶元素和堆底元素交换  
        HeadAdjust(A,1,i-1); //把剩余的待排序元素整理成堆  
    }  
}
```

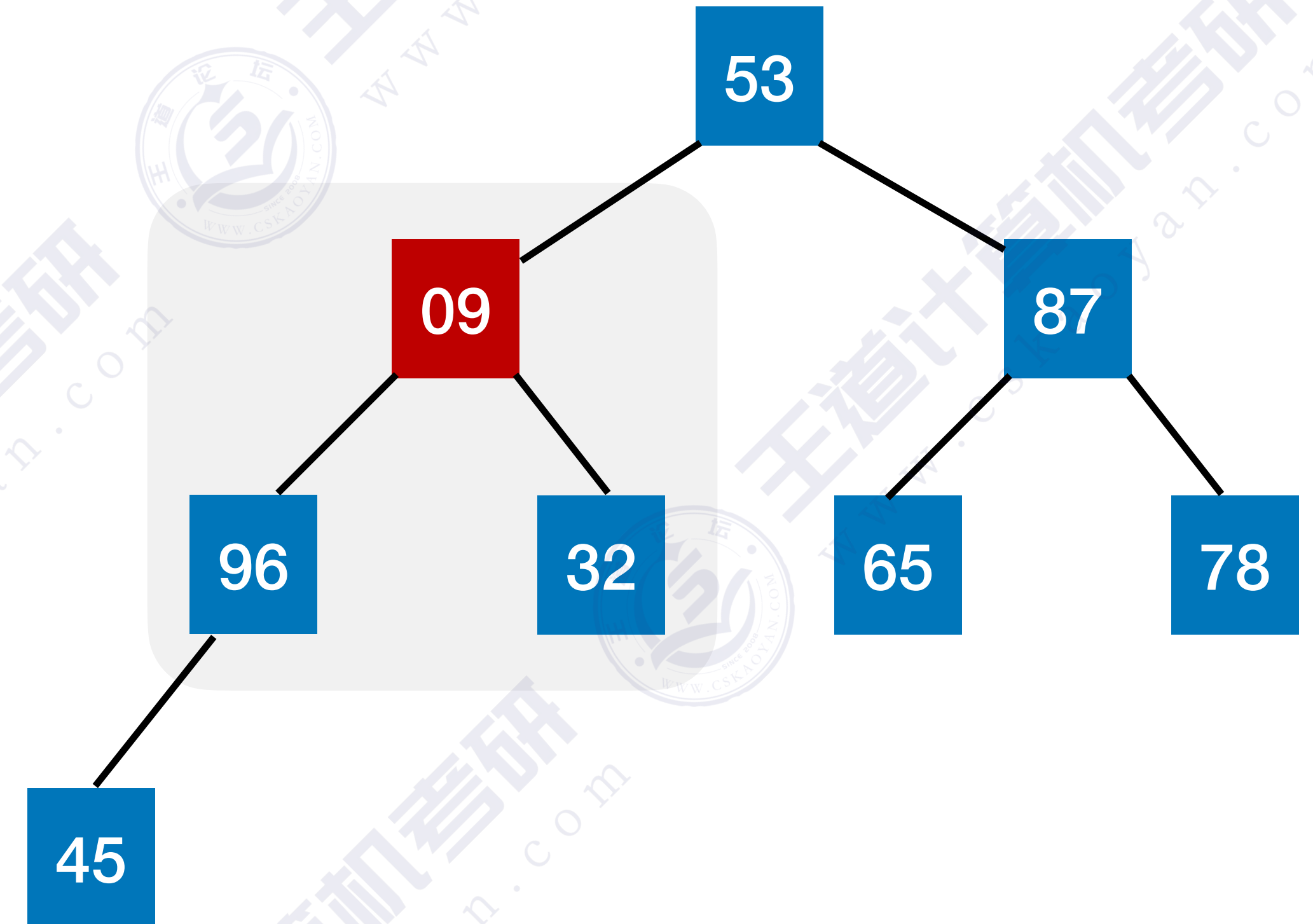
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值, 以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```

算法效率分析

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

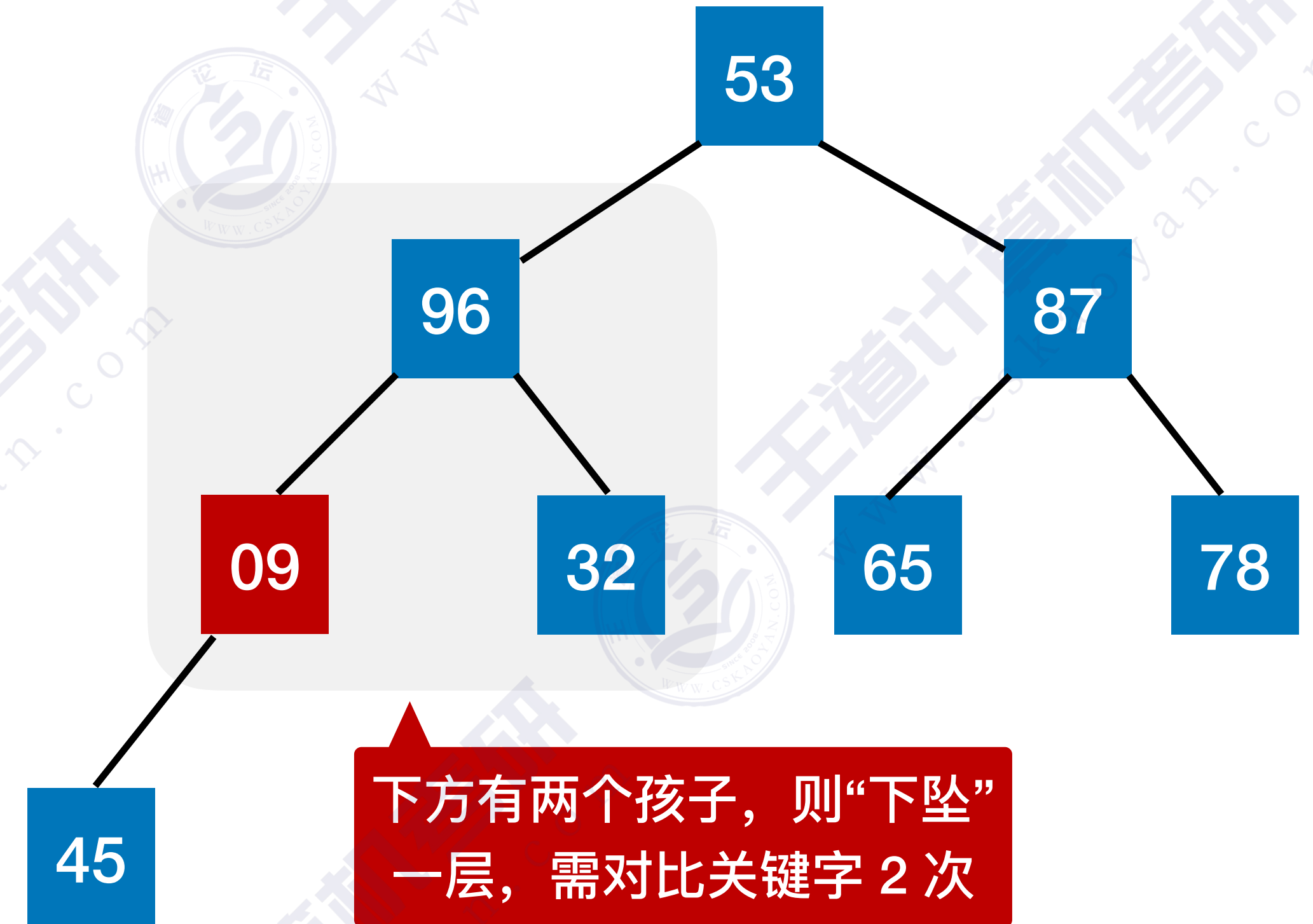
```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k];           //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++;           //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i];       //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i;             //修改k值,以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0];           //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```



算法效率分析

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

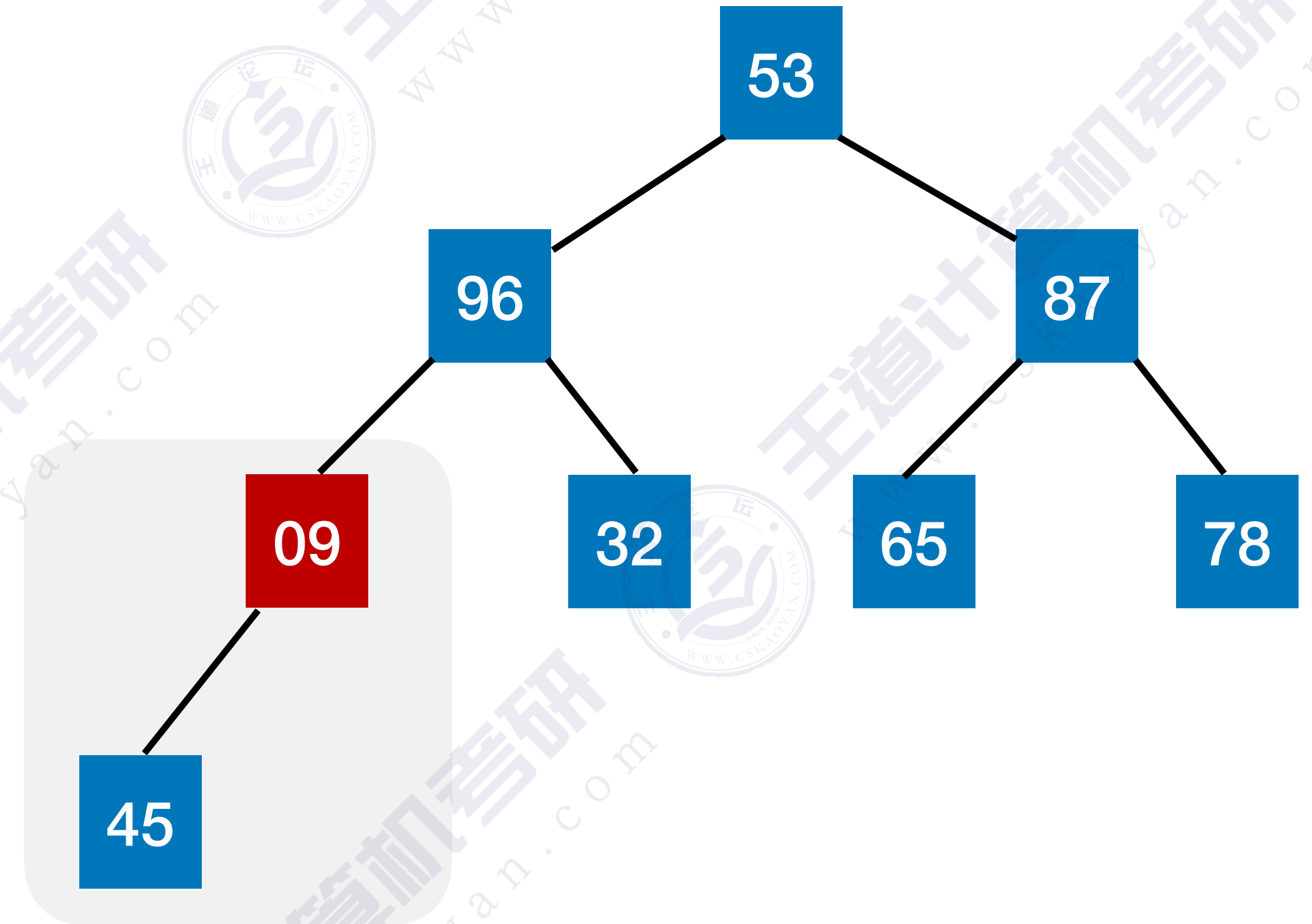
```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k];           //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++;           //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i];       //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i;             //修改k值,以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0];           //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```



算法效率分析

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

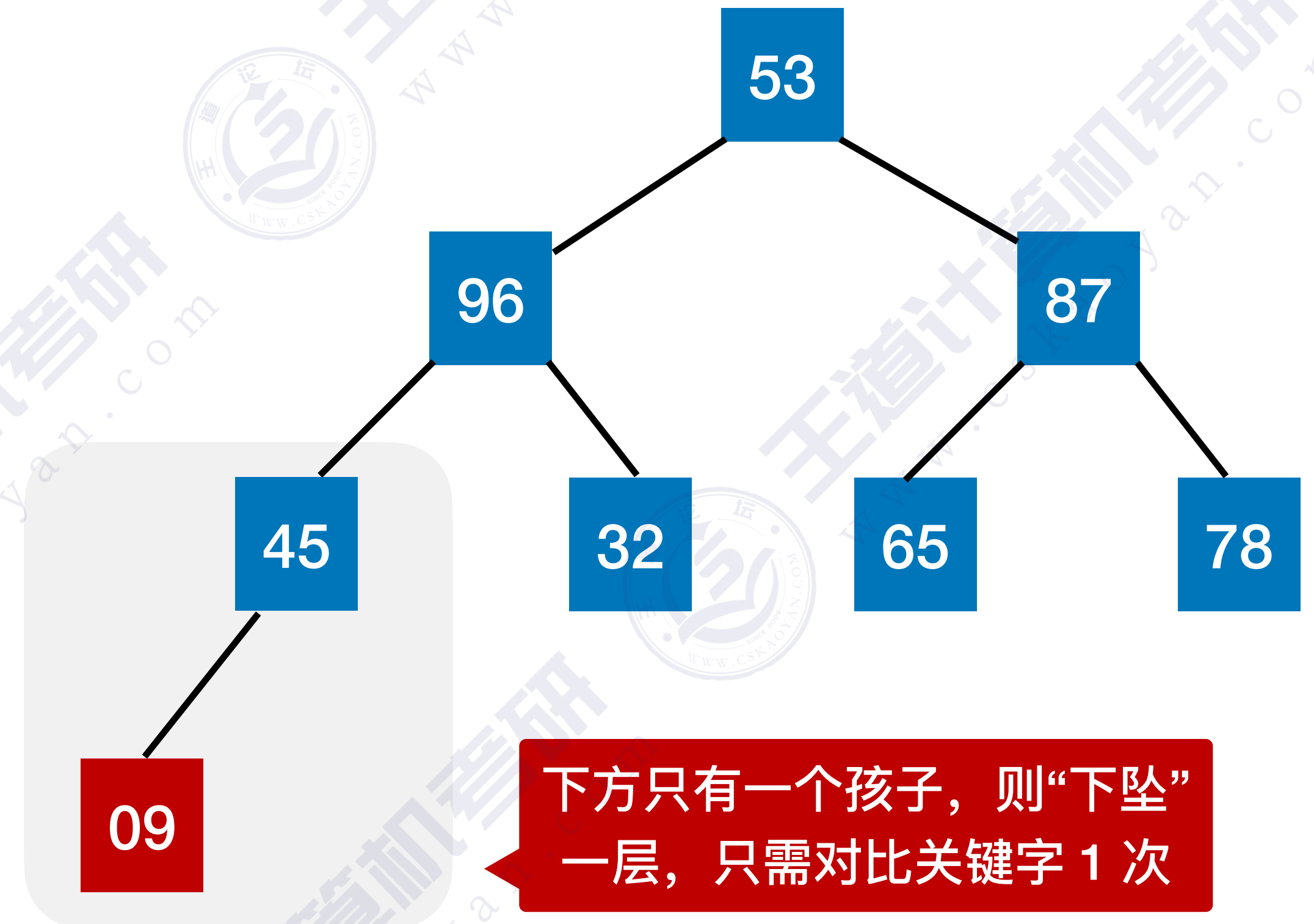
```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k];           //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++;           //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i];       //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i;             //修改k值,以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0];           //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```



算法效率分析

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){
    A[0]=A[k];           //A[0]暂存子树的根结点
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])
            i++;           //取key较大的子结点的下标
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束
        else{
            A[k]=A[i];      //将A[i]调整到双亲结点上
            k=i;            //修改k值,以便继续向下筛选
        }
    }
    A[k]=A[0];           //被筛选结点的值放入最终位置
}
```



结论: 一个结点, 每“下坠”一层, 最多只需对比关键字2次

若树高为 h , 某结点在第 i 层, 则将这个结点向下调整最多只需要“下坠” $h-i$ 层, 关键字对比次数不超过 $2(h-i)$

算法效率分析

结论：一个结点，每“下坠”一层，最多只需对比关键字2次

若树高为 h ，某结点在第 i 层，则将这个结点向下调整最多只需要“下坠” $h-i$ 层，关键字对比次数不超过 $2(h-i)$

n 个结点的完全二叉树树高 $h = \lfloor \log_2 n \rfloor + 1$

第 i 层最多有 2^{i-1} 个结点，而只有第 $1 \sim (h-1)$ 层的结点才有可能需要“下坠”调整

将整棵树调整为大根堆，关键字对比次数不超过 $\sum_{i=h-1}^1 2^{i-1} 2(h-i) = \sum_{i=h-1}^1 2^i (h-i) = \sum_{j=1}^{h-1} 2^{h-j} j \leq 2n \sum_{j=1}^{h-1} \frac{j}{2^j} \leq 4n$

差比数列求和
(错位相减法)

求和结果小于2

建堆的过程，关键字对比次数不超过 $4n$ ，建堆时间复杂度= $O(n)$

算法效率分析

//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

$O(n)$

//堆排序的完整逻辑

```
void HeapSort(int A[],int len){  
    BuildMaxHeap(A,len); //初始建堆  
    for(int i=len;i>1;i--){ //n-1趟的交换和建堆过程  
        swap(A[i],A[1]); //堆顶元素和堆底元素交换  
        HeadAdjust(A,1,i-1); //把剩余的待排序元素整理成堆  
    }  
}
```

总共需要 $n-1$ 趟，每一趟交换后
都需要将根节点“下坠”调整

根节点最多“下坠” $h-1$ 层，每下坠一层

而每“下坠”一层，最多只需对比关键字2次，因此每一趟排序复杂度不超过 $O(h) = O(\log_2 n)$

共 $n-1$ 趟，总的时间复杂度 = $O(n\log_2 n)$

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值，以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```

算法效率分析

//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

$O(n)$

//堆排序的完整逻辑

```
void HeapSort(int A[],int len){  
    BuildMaxHeap(A,len); //初始建堆  
    for(int i=len;i>1;i--){ //n-1趟的交换和建堆过程  
        swap(A[i],A[1]); //堆顶元素和堆底元素交换  
        HeadAdjust(A,1,i-1); //把剩余的待排序元素整理成堆  
    }  
}
```

$O(n\log_2 n)$

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

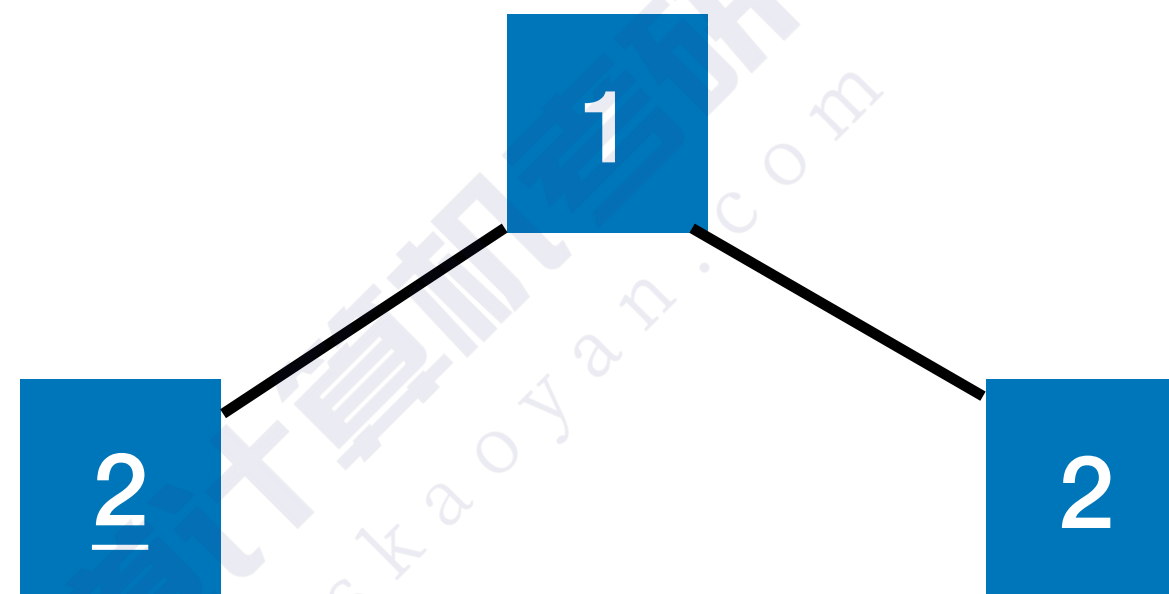
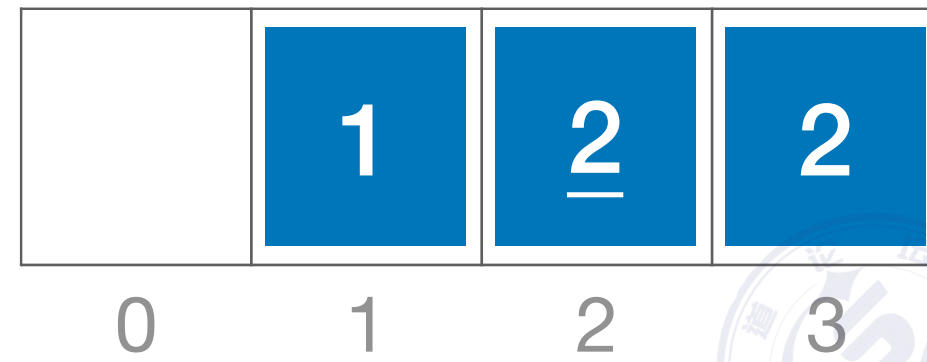
```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2){ //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
        if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
        else{  
            A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
            k=i; //修改k值, 以便继续向下筛选  
        }  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```

堆排序的时间复杂度 = $O(n) + O(n\log_2 n) = O(n\log_2 n)$

堆排序的空间复杂度 = $O(1)$

稳定性

初始序列:



初始化大根堆

//建立大根堆

```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

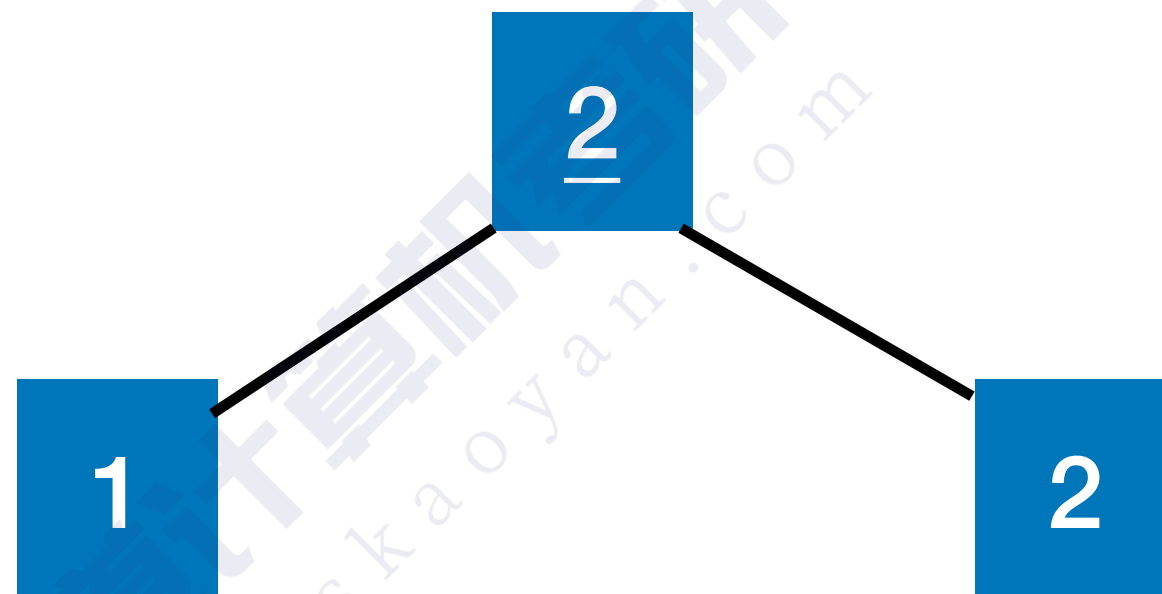
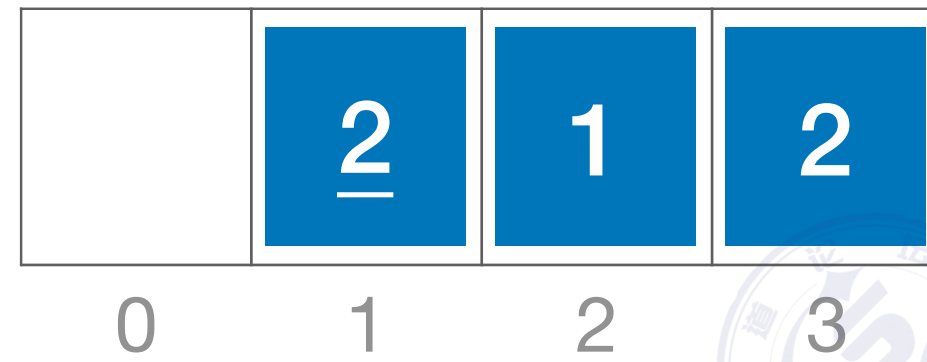
//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2) //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
    if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
    else{  
        A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
        k=i; //修改k值,以便继续向下筛选  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```

注意: 若左右孩子一样大, 则优先和左孩子交换

稳定性

大根堆：根 \geq 左、右



注意：若左右孩子一样大，则优先和左孩子交换

//建立大根堆

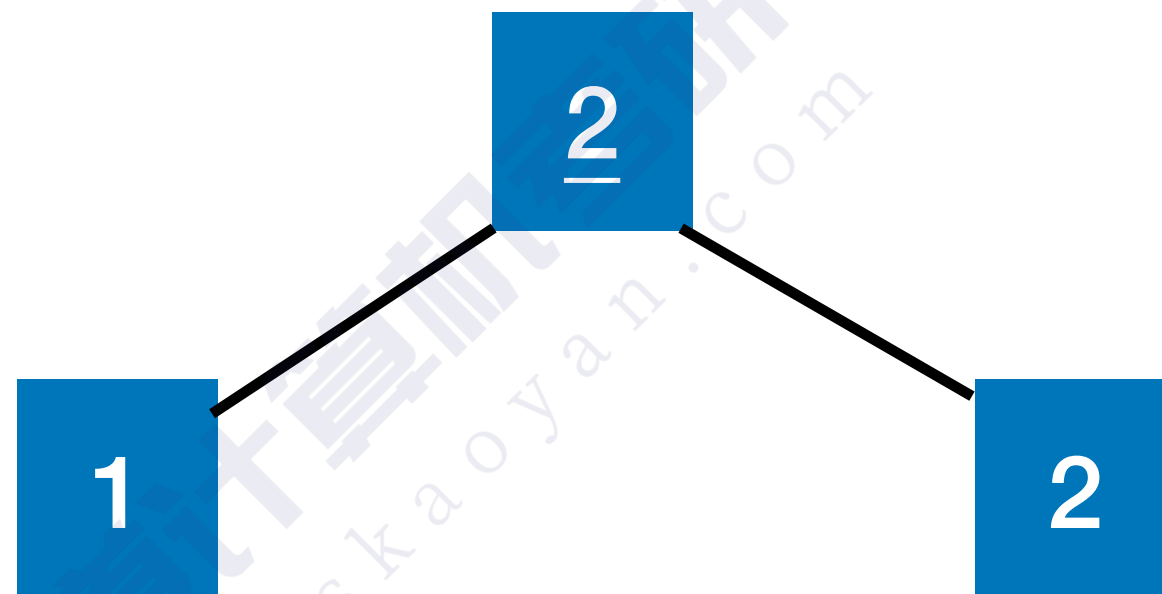
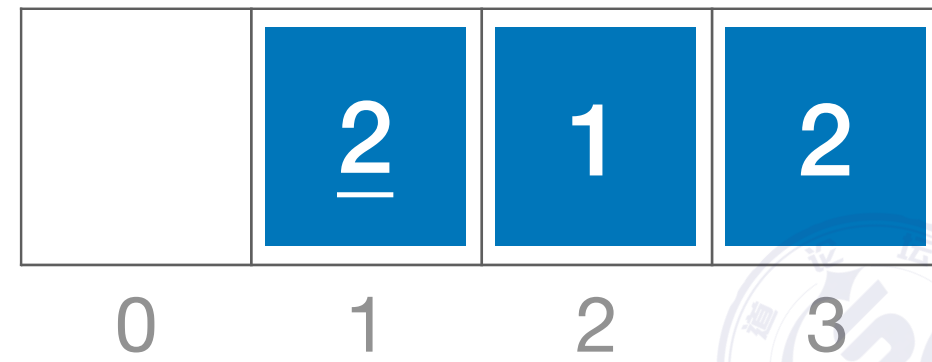
```
void BuildMaxHeap(int A[],int len){  
    for(int i=len/2;i>0;i--) //从后往前调整所有非终端结点  
        HeadAdjust(A,i,len);  
}
```

//将以 k 为根的子树调整为大根堆

```
void HeadAdjust(int A[],int k,int len){  
    A[0]=A[k]; //A[0]暂存子树的根结点  
    for(int i=2*k;i<=len;i*=2) //沿key较大的子结点向下筛选  
        if(i<len&&A[i]<A[i+1])  
            i++; //取key较大的子结点的下标  
    if(A[0]>=A[i]) break; //筛选结束  
    else{  
        A[k]=A[i]; //将A[i]调整到双亲结点上  
        k=i; //修改k值，以便继续向下筛选  
    }  
    A[k]=A[0]; //被筛选结点的值放入最终位置  
}
```


稳定性

大根堆：根 \geq 左、右



//堆排序的完整逻辑

```
void HeapSort(int A[],int len){  
    BuildMaxHeap(A,len);  
    for(int i=len;i>1;i--){  
        swap(A[i],A[1]);  
        HeadAdjust(A,1,i-1);  
    }  
}
```

//初始建堆

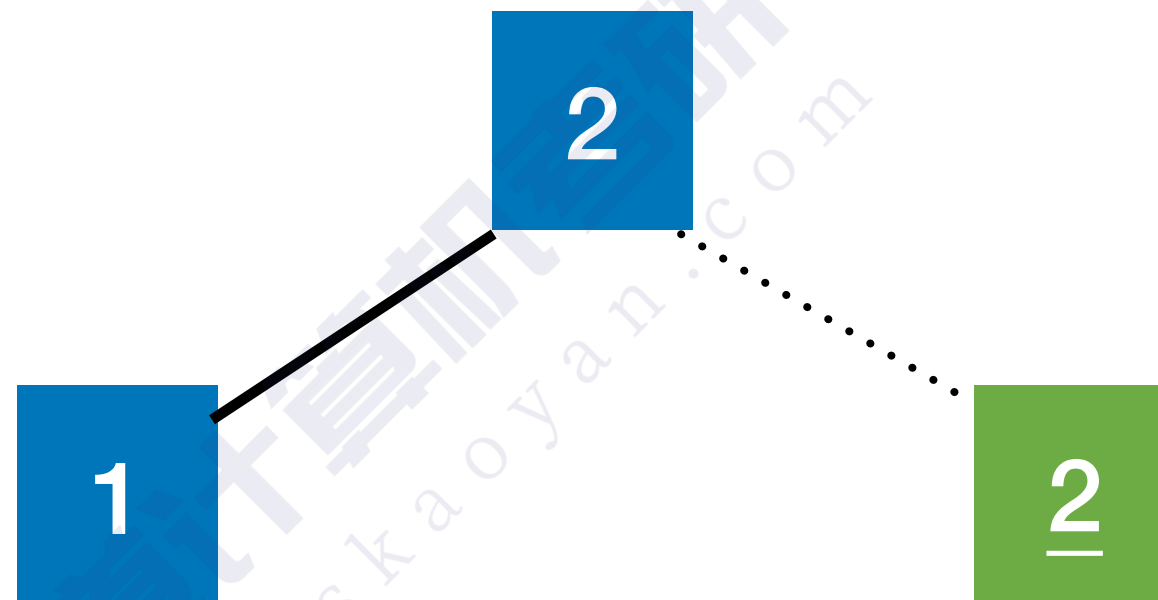
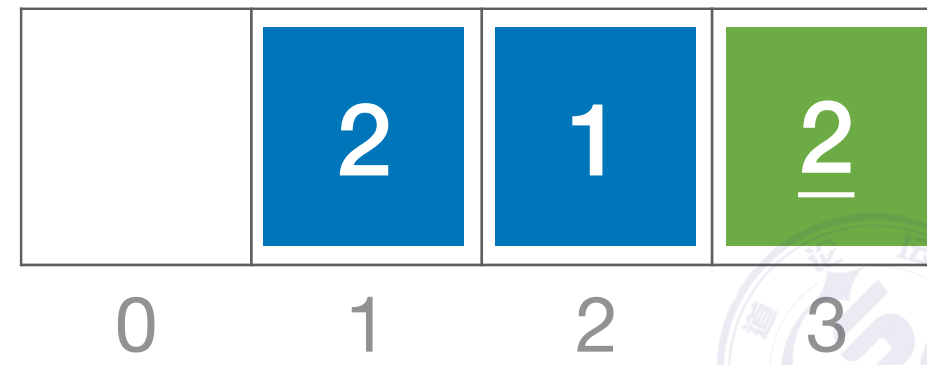
//n-1趟的交换和建堆过程

//堆顶元素和堆底元素交换

//把剩余的待排序元素整理成堆

稳定性

大根堆：根 \geq 左、右



//堆排序的完整逻辑

```
void HeapSort(int A[],int len){  
    BuildMaxHeap(A,len);  
    for(int i=len;i>1;i--){  
        swap(A[i],A[1]);  
        HeadAdjust(A,1,i-1);  
    }  
}
```

//初始建堆

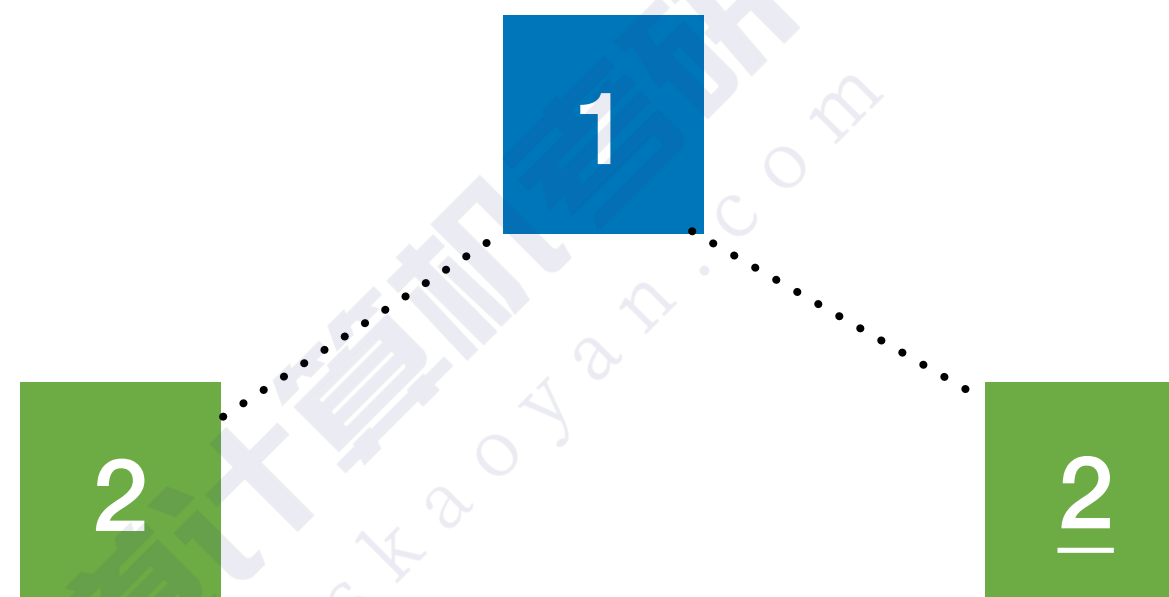
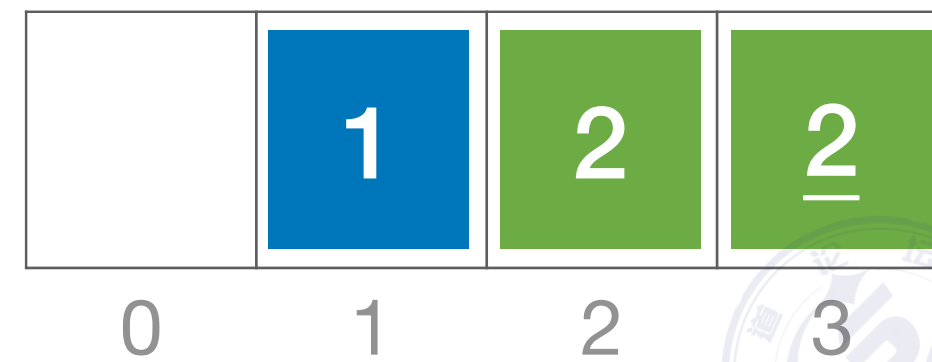
//n-1趟的交换和建堆过程

//堆顶元素和堆底元素交换

//把剩余的待排序元素整理成堆

稳定性

大根堆：根 \geq 左、右



//堆排序的完整逻辑

```
void HeapSort(int A[],int len){  
    BuildMaxHeap(A,len);  
    for(int i=len;i>1;i--){  
        swap(A[i],A[1]);  
        HeadAdjust(A,1,i-1);  
    }  
}
```

//初始建堆

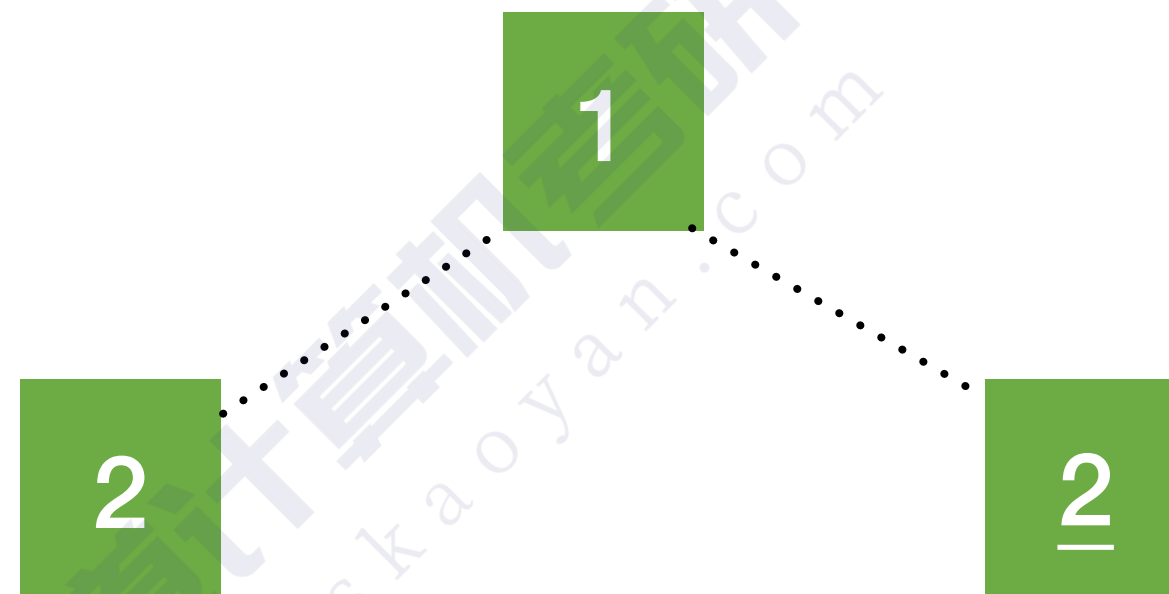
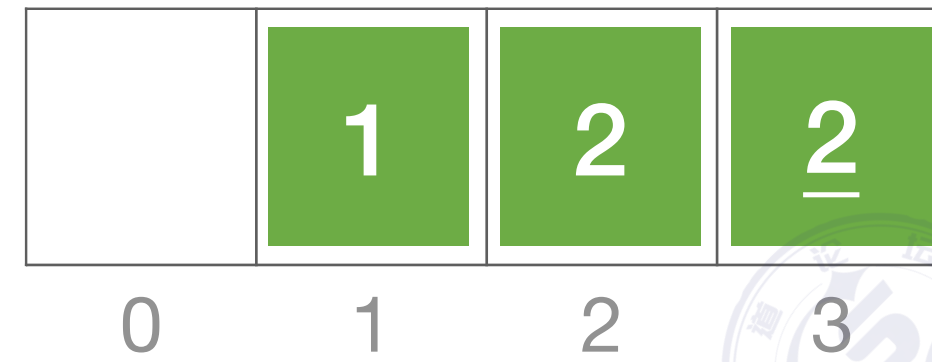
//n-1趟的交换和建堆过程

//堆顶元素和堆底元素交换

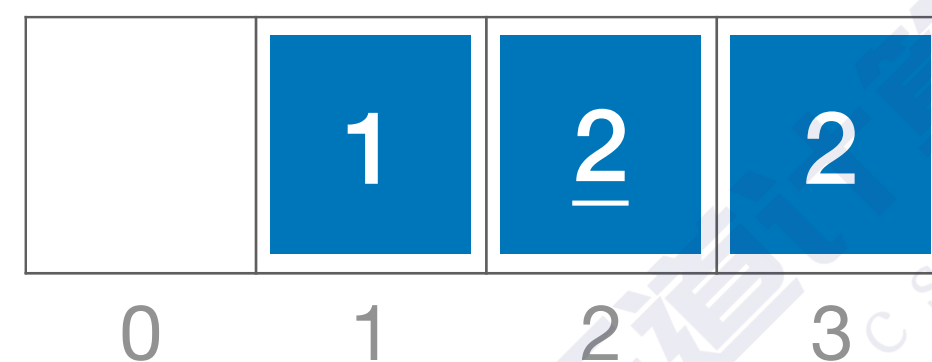
//把剩余的待排序元素整理成堆

稳定性

排序结果:



初始序列:



//堆排序的完整逻辑

```
void HeapSort(int A[],int len){  
    BuildMaxHeap(A,len);  
    for(int i=len;i>1;i--){  
        swap(A[i],A[1]);  
        HeadAdjust(A,1,i-1);  
    }  
}
```

//初始建堆

//n-1趟的交换和建堆过程

//堆顶元素和堆底元素交换

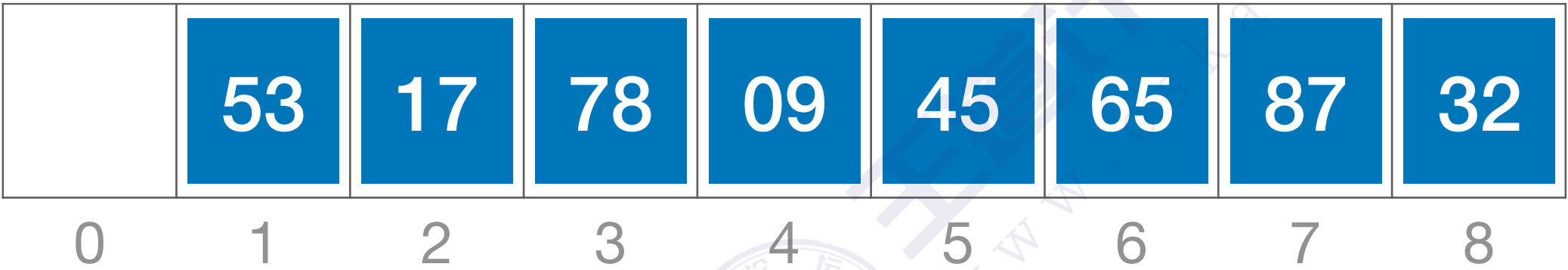
//把剩余的待排序元素整理成堆

结论: 堆排序是不稳定的

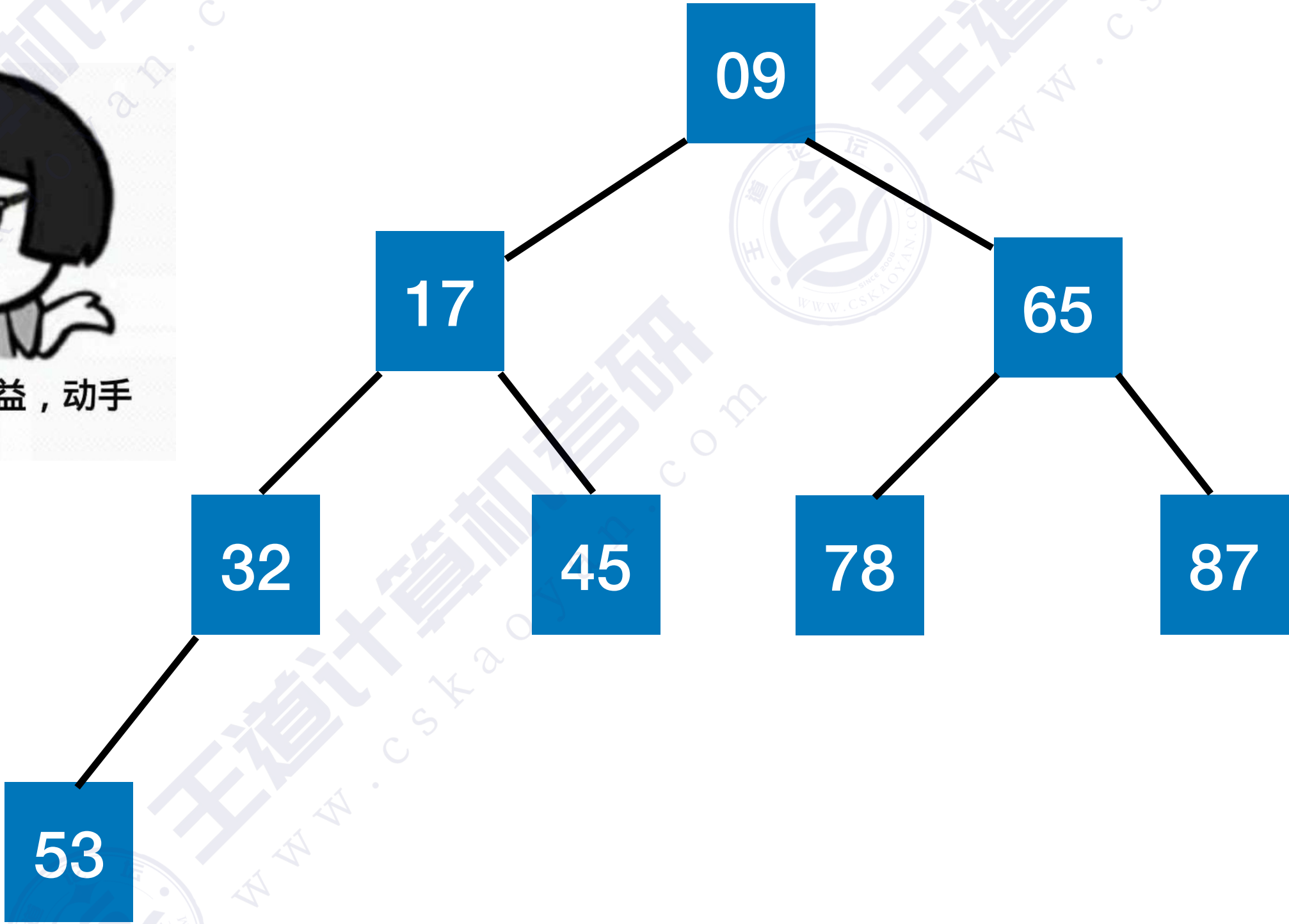
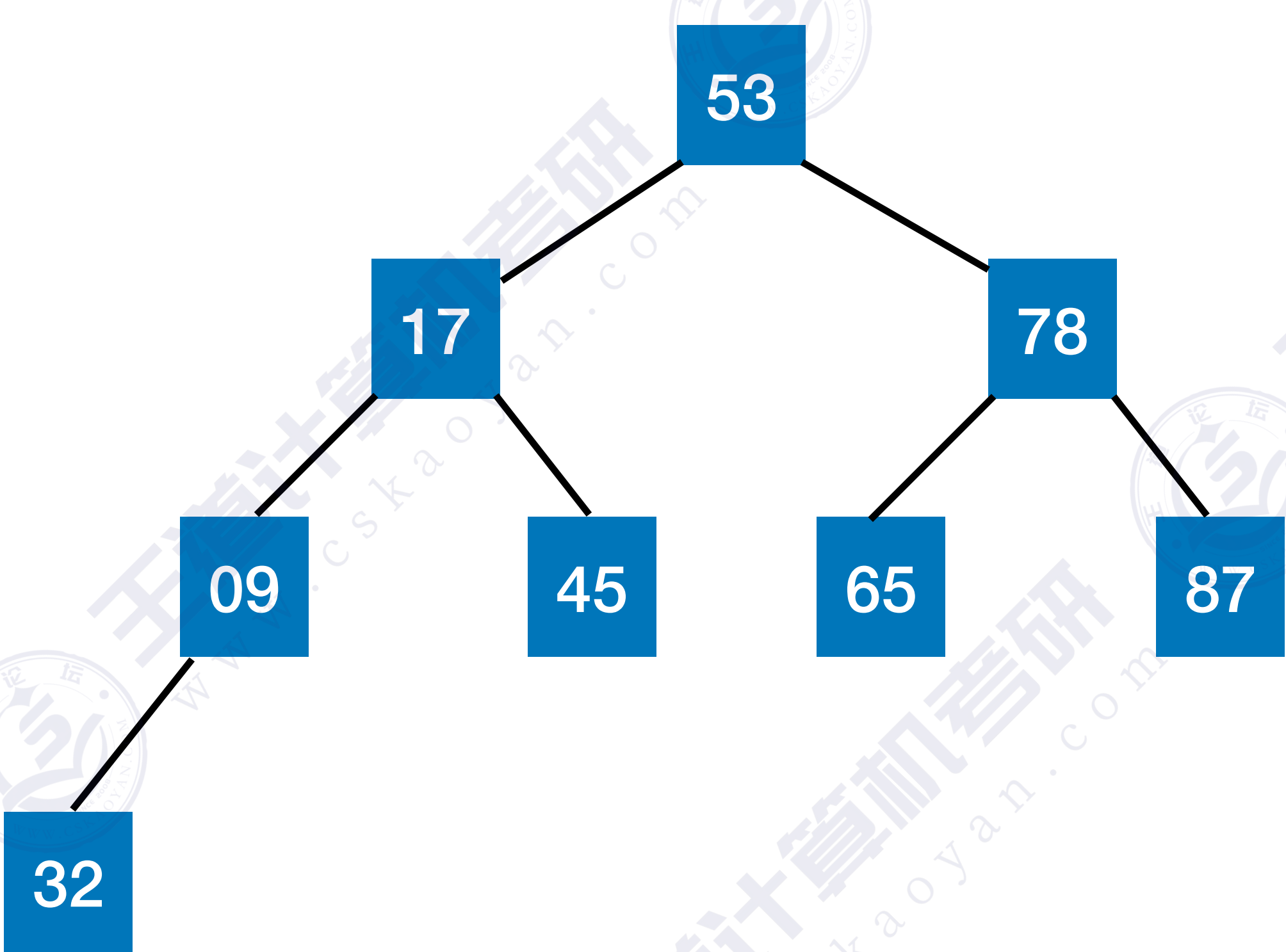
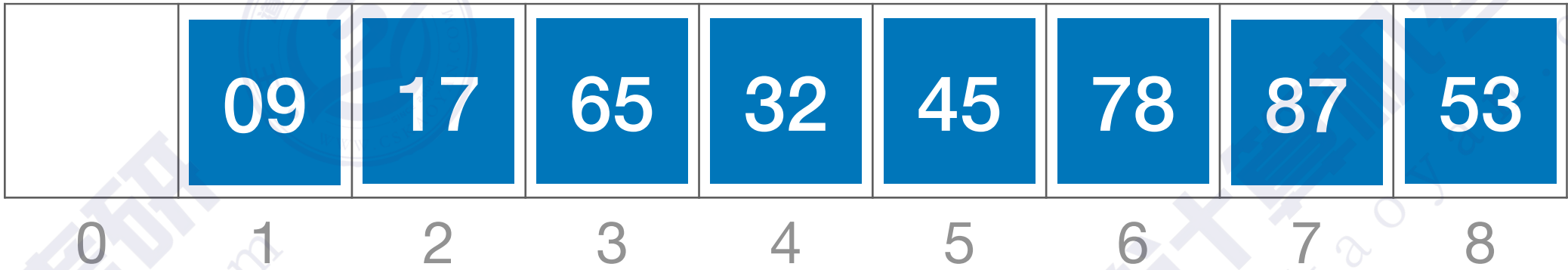
截屏练习：基于“小根堆”如何建堆、排序？



初始序列



初始化小根堆



注意：基于“小根堆”的堆排序得到“递减序列”

知识回顾与重要考点

